

Felipe Fischmann

**ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA DE
APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NO SUL DO BRASIL**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a Con-
clusão do Curso de Graduação em En-
genharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Bor-
ges Chaffe

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fischmann, Felipe

Estimativa da pegada hídrica de aproveitamentos
hidrelétricos no Sul do Brasil / Felipe Fischmann ;
orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe - Florianópolis, SC,
2016.

140 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Pegada hídrica.
3. Energia hidrelétrica. 4. Sul do Brasil. I. Chaffe,
Pedro Luiz Borges. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.
III. Título.

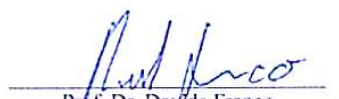
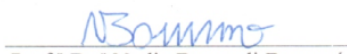
ESTIMATIVA DA PEGADA HÍDRICA DE APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NO SUL DO BRASIL

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação, em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Florianópolis, 09 de agosto de 2016.


Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
Orientador

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Davi de Franco
Membro da banca
Prof.ª Dr.ª Nadia Bernardi Bonumá
Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Crescer em um ambiente familiar onde a dedicação aos estudos é permitida e estimulada pode ser considerado um privilégio. Tendo sido este o meu caso, agradeço de coração a meus pais, avós e irmãos pelas oportunidades e pelo incentivo ao longo dos anos, e crédito a essas pessoas grande parte do sucesso obtido até este momento.

Diversos anos se passaram desde o início de minha graduação. Anos marcados, ao mesmo tempo, por longas horas de estudo e por experiências únicas fora do ambiente acadêmico. Em ambas as esferas, fui acompanhado por pessoas que muito admiro e às quais devo muito de meu crescimento pessoal e profissional. Portanto, obrigado às pessoas que me acompanharam em finais de semana inteiros fazendo projetos, e também às que me lembraram e lembram de que a graduação não se resume a isso. Obrigado pelas que viraram noites em minha companhia, seja nos estudos ou nos momentos de desaparecer.

Obrigado a minha namorada Tatiana, que me acompanhou e me apoiou em alguns dos momentos mais críticos dessa jornada, incluindo a elaboração deste trabalho.

Obrigado à sociedade brasileira que, através de seus impostos, permite que eu e milhares de outros estudantes tenham uma formação gratuita e de qualidade na Universidade Federal de Santa Catarina. Espera-se que este trabalho consista em uma humilde parte de minha retribuição por tal investimento.

Especificamente no contexto do presente trabalho, devo um agradecimento especial a meu orientador, Professor Pedro Chaffe, pela prestatividade em todas as etapas de sua elaboração. Agradeço também aos membros da banca, Professora Nadia Bonumá e Professor Davide Franco, pelas contribuições para o aprimoramento deste estudo. Outro agradecimento se dirige aos técnicos de diversas instituições cuja prestatividade e transparência no fornecimento de dados e esclarecimento de informações foi essencial para o escopo atingido neste trabalho. Destacam-se, especificamente, as contribuições do Instituto Agrônomo do Paraná (**IAPAR**), Sistema Meteorológico do Paraná (**SIMEPAR**), Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (**Ciram**), Centrais Elétricas de Santa Catarina (**Celesc**), Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (**CEEE**), Empresa de Pesquisa Energética (**EPE**), Agência Nacional de Energia Elétrica (**ANEEL**) e **Itaipu Binacional**. Também agradeço ao autor Eduardo de Oliveira Bueno pelas contribuições quanto ao acesso a dados de geração de energia.

If you wish to see the valleys, climb to the mountain top; if you desire to see the mountain top, rise into the cloud; but if you seek to understand the cloud, close your eyes and think

(Kahlil Gibran)

There is more in us than we know. If we can be made to see it, perhaps for the rest of our lives we will be unwilling to settle for anything less

(Kurt Hahn)

RESUMO

As perdas de água associadas à geração de energia – inclusive a hidrelétrica – vem recebendo crescente reconhecimento em âmbito internacional. Um indicador difundido para a comparação de impactos de diferentes atividades sobre a disponibilidade de recursos hídricos consiste na pegada hídrica. O presente trabalho envolve a aplicação de tal indicador à geração de energia hidrelétrica em aproveitamentos selecionados da região Sul do Brasil. Por meio do algoritmo WREVAP, geraram-se séries históricas de evaporação estimada mensal para 41 usinas hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas. Tais dados foram normalizados pelas respectivas gerações mensais de energia, de modo a gerar estimativas de volume de água evaporado por energia gerada – a pegada hídrica. A média simples e a média ponderada pela geração de energia das unidades foram de $22,35 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ e $14,89 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, respectivamente. Quando considerado o consumo médio de energia elétrica de residências da região do estudo, verifica-se que tais valores se traduzem em um consumo de água virtual da mesma ordem de grandeza que a demanda direta por água de redes de distribuição. Observou-se uma relação entre a localização geográfica dos aproveitamentos e suas perdas por evaporação. Entretanto, tal fator foi sobreposto pela variabilidade temporal na geração de energia, que possui oscilações intermensais de maior magnitude e menos previsíveis. Não se observaram correlações significativas entre variáveis como profundidade média, área superficial ou cota do nível d'água a montante dos reservatórios e as pegadas hídricas estimadas para as respectivas unidades geradoras. Entretanto, observou-se que a frequentemente adotada relação área inundada / potência instalada constitui um bom indicador da pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos.

Palavras-chave: Pegada hídrica. Energia hidrelétrica. Sul do Brasil.

ABSTRACT

Water losses related to power generation – including hydroelectricity – have received growing international recognition over recent years. Water footprinting is a disseminated index for the comparison of the effects derived from different activities on water resources. This study involves the application of this index to hydropower production by selected plants in the Southern region of Brazil. Through the WREVAP algorithm, time series of estimated monthly evaporation were generated for 41 hydroelectric power plants (UHE) and small hydroelectric power plants (PCH). This data was normalised by the respective monthly power outputs in order to generate estimates of the volume of water evaporated per unit of power production – the water footprint. The mean value for all power plants was $22,35 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, and the energy generation weighted average was $14,89 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$. When considering the mean residential electricity consumption in the area of interest, such figures translate into a virtual water consumption value within the same order of magnitude as reticulated water supply. The study identified a relationship between the geographic locations of hydropower plants and their evaporation losses. However, this factor was overridden by temporal variability in power outputs, which has greater oscillations and less predictable monthly behaviour. No significant correlation was found between variables such as average lake depth, surface area or the elevation of the water level on upstream reservoirs with the water footprint values for each power plant. However, it was verified that the frequently adopted flooded area / electricity generation capacity is an appropriate proxy indicator of the water footprint of hydropower stations.

Keywords: Water footprint. Hydropower. Southern Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contribuições percentuais das principais fontes de energia elétrica para os totais gerados no Brasil e nos estados da região Sul....	32
Figura 2 – Diferenciação entre recursos hídricos azuis e recursos hídricos verdes no ciclo hidrológico.	35
Figura 3 – A inserção da pegada hídrica azul e a pegada hídrica verde no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.	36
Figura 4 – Componentes selecionados do ciclo hidrológico antes e após a construção de um reservatório.....	39
Figura 5 – Comparação entre as composições e entre os valores das pegadas hídricas médias globais para geração de energia hidrelétrica e a partir de fontes selecionadas de biomassa.....	43
Figura 6 – Geração de energia, evaporação e pegada hídrica mensal de dois reservatórios associados a duas usinas hidrelétricas na Etiópia. ...	44
Figura 7 – Precipitação, evaporação e evapotranspiração em quatro localidades na Nova Zelândia.	47
Figura 8 – Principais fatores envolvidos no fenômeno da evaporação .	50
Figura 9 – Distribuição de climas no sul do Brasil de acordo com a classificação de Köppen-Geiger.....	54
Figura 10 – Distribuição geográfica de aproveitamentos hidrelétricos na região Sul do Brasil, destacando-se os principais operadores.....	56
Figura 11 – Sistema Salto de aproveitamentos hidrelétricos.	58
Figura 12 – Sistema Jacuí de aproveitamentos hidrelétricos.	59
Figura 13 – Sistema Cedros/Palmeiras de aproveitamentos hidrelétricos.	60
Figura 14 – Concepção artística do aproveitamento hidrelétrico Salto Pilão.	62
Figura 15 – Ilustração do efeito oásis.	64
Figura 16 – Relação entre evaporações de tanque classe A medidas em duas localidades da Califórnia, EUA.	65

Figura 17 – Comparação de taxas de evaporação em tanques ao longo de campos de algodão irrigado em 27 de dezembro de 1967.....	66
Figura 18 – Ilustração do conceito de relação complementar aplicado a superfícies terrestres para valor constante de energia radiante.....	68
Figura 19 – Ilustração do conceito de relação complementar aplicado a superfícies de corpos d’água para valor constante de energia radiante.	69
Figura 20 – Comparação entre estimativas de evaporação anual em lagos a partir do balanço de massas e do modelo CRLE.	72
Figura 21 – Efeito do <i>routing</i> na redução da faixa anual de desvios mensais em estimativas de evaporação.	73
Figura 22 – Ilustração do critério de alocação dos aproveitamentos hidrelétricos a estações meteorológicas.....	83
Figura 23 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na altitude (nível d’água a montante) do reservatório.....	86
Figura 24 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na profundidade média do reservatório.	88
Figura 25 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na temperatura média da série histórica de entrada.	89
Figura 26 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na temperatura média da série histórica de entrada.	90
Figura 27 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na umidade relativa média da série histórica de entrada.	91
Figura 28 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na insolação média da série histórica de entrada.	92
Figura 29 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na insolação média da série histórica de entrada.	93
Figura 30 – Isolinhas com intervalo de 50 mm a partir da interpolação, pelo critério <i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i> , das evaporações de	

lago médias anuais estimadas a partir dos resultados do modelo WREVAP.....	95
Figura 31 – Evaporação de lago média anual e altitude do reservatório – círculos proporcionais às respectivas áreas alagadas.	96
Figura 32 – Comparação entre estimativas de evaporação real geradas pelo algoritmo WREVAP desagregadas por estado e pelo modelo SisEvapo (ONS, 2004).....	97
Figura 33 – Diferença entre evaporação média anual em lago (AET_{mm}) e precipitação média anual (P).....	99
Figura 34 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados no Rio Grande do Sul.....	102
Figura 35 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados em Santa Catarina e divisas.	103
Figura 36 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados no Paraná e divisas.....	104
Figura 37 – Distribuição espacial das pegadas hídricas médias mensais (de acordo com o tamanho dos círculos) e das relações área alagada / potência instalada (A/PO , de acordo com a escala de cores).	106
Figura 38 – Séries históricas de (a) AET e (b) geração mensal de energia comparadas às pegadas hídricas mensais do aproveitamento de Barra Grande, Santa Catarina.	110
Figura 39 – Regressões entre (a) AET e (b) inverso da geração mensal de energia às respectivas pegadas hídricas mensais do aproveitamento de Barra Grande, Santa Catarina.	112
Figura 40 – Pegadas hídricas médias estimadas para UHE selecionadas considerando-se e excluindo-se meses com geração excepcionalmente baixa de energia.	113
Figura 41 – Pegada hídrica média de acordo com a profundidade média do reservatório.	115
Figura 42 – Pegada hídrica média de acordo com a área superficial do reservatório – círculos proporcionais à geração média anual de energia.	116
Figura 43 – Pegada hídrica média de acordo com a latitude do aproveitamento hidrelétrico.	117

Figura 44 – Pegada hídrica média de acordo com a altitude do reservatório.....	118
Figura 45 – Pegada hídrica média de acordo com a relação queda bruta / altura da barragem do aproveitamento hidrelétrico.....	119
Figura 46 – Pegada hídrica média de acordo com a potência outorgada do aproveitamento hidrelétrico.....	120
Figura 47 – Potência outorgada e geração média de energia ao longo do período considerado no estudo (excluindo Itaipu).	121
Figura 48 – Pegada hídrica média e relação área alagada / potência outorgada.....	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados de entrada para o programa WREVAP.	71
Quadro 2 – Fontes de dados para as estimativas de pegadas hídricas... ..	79
Quadro 3 – Disponibilidade temporal de séries históricas de dados climáticos da estação meteorológica mais próxima e de geração de energia por aproveitamento hidrelétrico.....	81
Quadro 4 – Meses com geração de energia considerada excepcionalmente baixa.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias das pegadas hídricas (PH) de acordo com a fonte de energia nos EUA, ponderadas pela produção de energia por estabelecimento.	40
Tabela 2 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na salinidade do lago.	87
Tabela 3 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na precipitação média anual adotada.	87
Tabela 4 – Pegada hídrica mínima (PH min), média (PH med) e máxima (PH max), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) por aproveitamento hidrelétrico.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AET	Evaporação Real
IEA	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração de Energia
CBA	Companhia Brasileira do Alumínio
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica (Rio Grande do Sul)
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRAE	<i>Complementary Relationship Aerial Evaporation</i>
CRLE	<i>Complementary Relationship Lake Evaporation</i>
CRWE	<i>Complementary Relationship Wet-Surface Evaporation</i>
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EFV	Energia Fotovoltaica
EOL	Energia Eólica
EROWI	<i>Energy Return on Water Invested</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NA	Nível d'água
ONS	Operador do Sistema Nacional de Energia Elétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PEV	Evaporação Potencial
PH	Pegada Hídrica
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RH	Região hidrográfica
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina
SIGEL	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SisEvapo	Sistema de Avaliação da Evaporação Líquida dos Reservatórios
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termoelétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	30
1.1.1. Objetivo Geral	30
1.1.2. Objetivos Específicos	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	31
2.2 PEGADA HÍDRICA E CONCEITOS ASSOCIADOS	32
2.2.1. Classificação de acordo com o impacto no ciclo hidrológico	34
2.2.2. Classificação de acordo com a escala analisada	37
2.3 A PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA	37
2.4 EVAPORAÇÃO EM LAGOS E O ALGORITMO WREVAP	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 ÁREA DE ESTUDO	53
3.2 CASOS PARTICULARES DE APROVEITAMENTOS	57
3.2.1. Aproveitamentos associados a múltiplos reservatórios ...	57
3.2.2. Aproveitamentos com elevada queda de projeto	61
3.3 ESTIMATIVAS DE PEGADAS HÍDRICAS	63
3.3.1. Aplicação do modelo WREVAP	64
3.3.2. Fontes de dados	79
3.3.3. Alocação de estações meteorológicas a aproveitamentos hidrelétricos	82
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1 SENSIBILIDADE DO PROGRAMA WREVAP AOS PARÂMETROS DE ENTRADA	85
4.1.1. Altitude	85

4.1.2.	Salinidade.....	86
4.1.3.	Precipitação média anual.....	87
4.1.4.	Profundidade média do reservatório	87
4.1.5.	Temperatura média do ar.....	88
4.1.6.	Umidade relativa média do ar	90
4.1.7.	Insolação.....	91
4.2	ESTIMATIVAS DE EVAPORAÇÃO	94
4.3	ESTIMATIVAS DE PEGADAS HÍDRICAS	100
4.3.1.	Variabilidade espacial.....	100
4.3.2.	Variabilidade temporal.....	107
4.3.3.	Distorções causadas por meses com geração excepcional de energia	113
4.3.4.	Correlações entre características dos reservatórios e respectivas pegadas hídricas	114
4.3.4.1.	Profundidade média	115
4.3.4.2.	Área superficial.....	116
4.3.4.3.	Latitude	117
4.3.4.4.	Altitude	118
4.3.4.5.	Relação queda bruta / altura da barragem	119
4.3.4.6.	Potência outorgada.....	120
4.3.4.7.	Relação área alagada / potência outorgada.....	122
5.	CONCLUSÕES	123
5.1	LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS EMPREGADOS	123
5.2	ALTERNATIVAS PARA A MINIMIZAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA	123
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
	APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA FIXOS PARA O MODELO WREVP POR APROVEITAMENTO	135

APÊNDICE B – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PARA OBTENÇÃO DE SÉRIES HISTÓRICAS DE TEMPERATURA MÉDIA DO AR, UMIDADE MÉDIA DO AR E INSOLAÇÃO MÉDIA DIÁRIA	138
---	-----

APÊNDICE C – PROCEDIMENTO PADRÃO PARA GERAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE PEGADA HÍDRICA	140
---	-----

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a expansão da agricultura e atividades industriais em décadas recentes tem levado a aumentos substanciais nas demandas por recursos hídricos em escala global. Como resultado, a escassez de água tem se espalhado a diversas regiões, e mesmo áreas com disponibilidade hídrica elevada podem vir a enfrentar restrições devido a secas, ondas de calor, variações sazonais, mudanças climáticas, regulação ou uma combinação destes elementos (IEA, 2012). Conciliar as demandas humanas por este recurso com a necessidade de manutenção de suas funções ecológicas pode ser considerado um dos mais difíceis e importantes desafios do século XXI (POSTEL, 2000).

Um setor chave em tal contexto consiste na geração de energia. Esta e a disponibilidade hídrica apresentam uma relação de dependência recíproca (PASQUALETTI e KELLEY, 2008). O tratamento e adução de água consomem quantidades apreciáveis de energia (GLEICK, 1994 apud HERATH *et al.*, 2011). Simultaneamente, a água é um critério de crescente importância para a avaliação da viabilidade física, econômica e ambiental de empreendimentos de geração de energia (IEA, 2012). Um exemplo da magnitude de tal dependência consiste na verificação de que, nos EUA, o volume de água retirado de corpos d'água para tal propósito é próximo ao requerido pela agricultura (PASQUALETTI e KELLEY, 2008). Em âmbito internacional, publicações tem se referido a tal relação como *nexo energia-água*¹ (ALLAN, 2003; HERATH *et al.*, 2011; STILLWELL *et al.*, 2011), o qual, aliado à componente alimentação, tem sido objeto de crescente atenção nos últimos cinco anos (RODRÍGUEZ, 2016)

Entretanto, enquanto todos os outros setores da sociedade já empreendem esforços para a minimização do consumo *per capita* de água, a indústria de geração de energia elétrica está apenas a iniciar este processo (WILSON *et al.*, 2012). De modo geral, o projeto e a operação de usinas para geração de energia em rios tem considerado as perdas de água por evaporação nos reservatórios criados para este propósito (ONS, 2004). Tais perdas possuem papel de destaque principalmente em cenários de escassez de energia (ONS, 2004), como os que tendem a ser verificados em períodos de seca prolongada no Brasil. Entretanto, o efeito da evaporação na disponibilidade de recursos hídricos das bacias hidrográficas nas quais os aproveitamentos hidrelétricos estão inseridos tem sido vastamente ignorado.

¹ *Energy-water nexus* ou *water-energy nexus* em publicações na língua inglesa.

A partir da última década, um número crescente de estudos em âmbito internacional tem sido desenvolvido para estimar a magnitude de tal impacto. No contexto nacional, as crises de abastecimento de água registradas em anos recentes em diversas regiões do Brasil tem trazido crescente atenção e demandas por uma maior eficiência na gestão de recursos hídricos. Tal eficiência depende, entre outros fatores, de estimativas acuradas dos consumos e perdas de água associados a diversas atividades antrópicas. Um indicador utilizado na comparação entre tais volumes é a pegada hídrica, a qual utiliza a normalização como maneira de permitir a comparação de consumos associados a atividades distintas, conforme será detalhado na seção 2.2.

Em 2012 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas publicou o relatório “*Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*” (IPCC, 2012). Apesar de se tratar de um tópico tangencial ao tema principal do documento, apontou-se neste que a geração de energia hidrelétrica pode possuir um consumo de água entre uma e duas escalas de grandeza superior ao de outras fontes, renováveis e não-renováveis, proporcionalmente à quantidade de energia gerada – mesmo sem alusão direta ao termo “pegada hídrica”. Tal informação baseou-se em apenas dois estudos sobre o tema realizados até então, envolvendo quatro aproveitamentos hidrelétricos. O referido documento inclui a ressalva de que, no momento de sua elaboração, não haviam sido feitas estimativas globais das perdas de água associadas à geração de energia hidrelétrica e que as estimativas da literatura consultada apresentavam grande variabilidade de acordo com características climáticas e de projeto. De qualquer modo, os valores apresentados chamaram a atenção de membros da comunidade científica internacional, assim como de produtores de energia (BAKKEN *et al.*, 2013). A partir daquele momento, reforçou-se a busca pela padronização da metodologia utilizada para a obtenção de das estimativas de perdas de água por diversas formas de geração de energia (BAKKEN *et al.*, 2013), de modo a possibilitar um maior rigor na comparação entre os valores obtidos.

O documento *Disambiguation of water use statistics* publicado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (KOHLI *et al.*, 2010) define que um uso não-consuntivo de recursos hídricos se caracteriza por não alterar de modo substancial a quantidade de água disponível, sendo que esta retorna em sua quase totalidade ao sistema de origem. Entretanto, ressalta-se que a definição de “mudança substancial” pode ser interpretada de maneira distinta em diferentes países. No Brasil, a maior parte dos usos que se dão no próprio curso d’água são considerados não-consuntivos, sendo a construção

de barramentos explicitamente mencionada pela Agência Nacional de Águas (2013) como exemplo de tal categoria. A consideração da ANA vai ao encontro do apresentado no Panorama dos Recursos Hídricos de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2007). Entretanto, o supracitado relatório do IPCC (2012) considera possível a ocorrência de uso consuntivo da água em reservatórios associados a sistemas de produção de energia hidrelétrica.

Hoekstra *et al.* (2011) observaram um contexto de alienação, por parte dos consumidores finais, acerca das cadeias de processos envolvidas no fornecimento de produtos, e da influência da organização destas em seus respectivos impactos ambientais. Pode-se considerar tal constatação particularmente relevante no âmbito da geração de energia, que de modo geral ocorre em locais distantes dos de consumo. Tal cenário consiste em um embasamento adicional para a necessidade de quantificação das perdas de água associadas à produção de energia.

A elaboração de planos de bacia hidrográfica, nos quais são estimadas a disponibilidade e as demandas por recursos hídricos associadas a diversos usos de água, foi instituída já em 1997 através da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Adicionalmente, a disponibilidade hídrica é um item considerado nas etapas de planejamento para investimentos em setores como a indústria e a geração de energia. Deste modo, as informações obtidas e os métodos empregados no presente estudo podem vir a subsidiar processos de licenciamento ambiental e de elaboração e revisão de planos de bacia hidrográfica.

Neste contexto, a proposta do presente trabalho é a de estimar as perdas de água por evaporação aproveitamentos hidrelétricos distribuídos na região Sul do Brasil, abrangendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Adicionalmente, serão verificadas possíveis correlações entre as características construtivas de cada barramento e suas respectivas pegadas hídricas.

A seção 2 consiste em uma revisão da bibliografia mais relevante e atualizada dos temas abrangidos pelo presente trabalho. É traçado um panorama da geração de energia elétrica no Brasil e especificamente nos estados da região Sul. No mesmo capítulo descreve-se o conceito de pegada hídrica, associando-o a termos análogos empregados na literatura e aos diferentes procedimentos de cálculo passíveis de adoção para sua quantificação. A seção 3 contém uma descrição sucinta da área de estudo, além dos procedimentos utilizados para a geração de estimativas de pegadas hídricas, incluindo a relação complementar e especificamente o algoritmo WREVAP, empregado no presente estudo para a geração de estimativas de evaporação mensal. A seção 4 apresenta os resultados

obtidos em termos de evaporação nos reservatórios, pegadas hídricas e comparações com parâmetros diversos, de acordo com os objetivos estabelecidos a seguir. Na seção 5 são apresentadas as principais conclusões tomadas a partir da análise dos resultados obtidos, além de considerações e sugestões para futuros trabalhos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é estimar a pegada hídrica associada à geração de energia hidrelétrica por empreendimentos selecionados na região Sul do Brasil e divisas.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Verificar a sensibilidade, a variáveis selecionadas, de um modelo para estimativas de evaporação baseado na relação complementar;
- Estimar as perdas por evaporação em reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos do Sul do Brasil;
- Determinar fatores com influência preponderante na pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

No Brasil, estima-se que o consumo anual total de eletricidade na rede deva aumentar de 473.395 GWh em 2014 para 693.469 GWh em 2024 – uma taxa anual média de 3.9% (EPE, 2015). Usinas Hidrelétricas (UHE) consistem na principal fonte de eletricidade no país, correspondendo a aproximadamente 64.87% da geração em 2015 e a 20,99% da capacidade instalada prevista para os empreendimentos em construção no país em Maio de 2016 (ANEEL, 2016a).

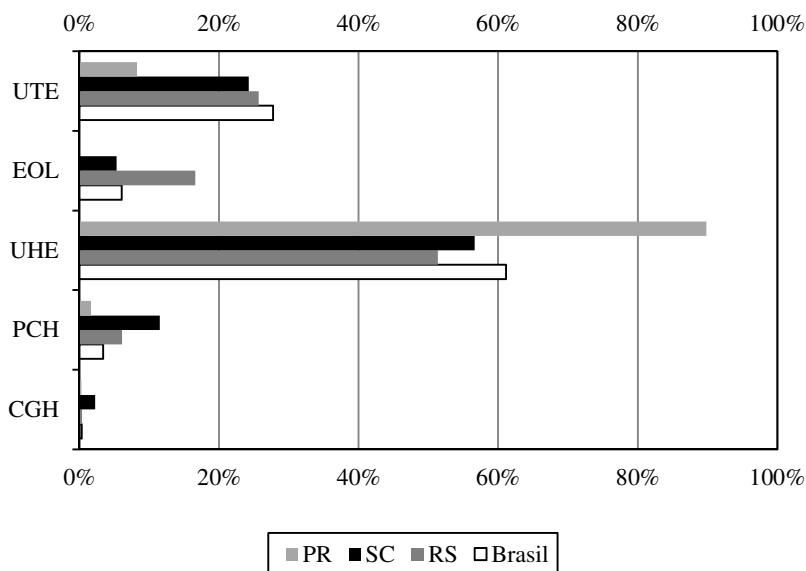
Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL (2016a), em maio de 2016 existem, respectivamente, 17, 12 e 13 usinas hidrelétricas (UHE) em operação no RS, SC e PR. Neste contexto, cabe mencionar a definição de PCH (Pequena Central Hidrelétrica) vigente no período de elaboração do presente estudo, dada pela Resolução Normativa ANEEL n. 673/2015 (ANEEL, 2015a). O Art. 2º desta estabelece que:

Serão considerados empreendimentos com características de PCH aqueles empreendimentos destinados a autoprodução ou produção independente de energia elétrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio. (ANEEL, 2015a).

Deste modo, empreendimentos que excedam os valores máximos estipulados para potência ou área inundada devem ser considerados como UHE. Sendo assim, questiona-se o critério adotado para classificação dos aproveitamentos constantes no Banco de Informações de Geração da ANEEL, dado que diversos empreendimentos com capacidades instaladas e áreas inundadas inferiores às estipuladas pela própria ANEEL são especificados em tal banco de dados como UHE. Alguns exemplos de tal distorção são os aproveitamentos de Bracinho, Cedros e Palmeiras, todos localizados no estado de Santa Catarina, tendo o último sido adotado no presente estudo devido à disponibilidade de séries históricas de geração.

Os aproveitamentos hidrelétricos – Centrais de Geração Hidrelétrica (CGH), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e UHE – também constituem a principal fonte de energia elétrica nos estados do Sul do Brasil. A contribuição combinada fiscalizada destes é de 57,8%, 70,4% e 91,7% do total no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e no Paraná, respectivamente (ANEEL, 2016a). As frações correspondentes às principais fontes de energia elétrica no Brasil e nestes três estados são apresentadas na figura 1.

Figura 1 – Contribuições percentuais das principais fontes de energia elétrica para os totais gerados no Brasil e nos estados da região Sul.



Siglas: UTE – Usinas Termoeletricas; EOL – Usinas Eólicas;
 UHE – Usinas Hidrelétricas; PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas;
 CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas
 Fonte de dados: ANEEL (2016a)

2.2 PEGADA HÍDRICA E CONCEITOS ASSOCIADOS

O conceito de *Virtual Water* ou “Água Virtual” foi proposto inicialmente na década de 1990 em referência ao volume de recursos hídricos associado à produção de *commodities*, em particular grãos (ALLAN, 1998). O autor explicitou a noção de que, ao importar um dado produto,

um país deixa de consumir a quantidade de água associada a sua produção, sendo esta em vez utilizada no país de origem. Tal volume, portanto, seria passível de ser economizado por países de clima árido mediante a substituição de sua produção local pela importação de produtos a partir de regiões com maior disponibilidade hídrica.

Especificamente em referência ao consumo de água associado à geração de energia, Mulder *et al* (2010) empregam a expressão de ***Energy Return on Water Invested*** (EROWI) ou “Retorno de Energia sobre o Investimento de Água”. Tal conceito se refere à quantia de energia produzida por unidade de água consumida por um dado empreendimento gerador de energia, e foi defendido por Wilson *et al.* (2012) como uma medida para apoiar a tomada de decisão pela iniciativa privada e comissões de agências reguladoras. Este conceito possui proximidade ao inverso da pegada hídrica. Wilson *et al.* (2012) adotaram o termo ***Water Use Factor*** ou “Fator de Uso de Água” para designar a relação entre a água consumida e a energia produzida pelos diferentes estabelecimentos de geração.

A partir da primeira década deste século, a utilização do termo “pegada hídrica” passou a ser adotada como um indicador mais abrangente dos aportes de água associados a diferentes atividades e produtos. Comparando-a especificamente ao conceito de água virtual, Hoekstra *et al.* (2011), esclarecem que, no caso da pegada hídrica, são considerados:

- a distribuição do consumo ao longo do tempo (aspectos temporais) e
- o modo pelo qual o uso ocorre (aspectos espaciais).

Classifica-se este último aspecto de acordo com o ponto do ciclo hidrológico no qual ocorre a indisponibilização de água. Tal categorização é realizada através da consideração da existência de três tipos de utilização de recursos hídricos: a pegada hídrica azul, a pegada hídrica verde e a pegada hídrica cinza, conforme abordado adiante. Neste contexto Berger e Finkbeiner (2010) mencionam que “a pegada hídrica quantitativa de um produto possui o mesmo valor que o seu conteúdo de água virtual”. Alguns casos específicos em que ocorre uso consuntivo de recursos hídricos – e, portanto, existe pegada hídrica – identificados por Hoekstra *et al.* (2011) incluem:

- Evaporação da água;
- Incorporação da água a um produto;
- Desvio da água a outra bacia hidrográfica ou ao oceano.

A quantificação do consumo ou apropriação de água para diversas atividades e produtos também tem sido adotada em Avaliações de Ciclo de Vida (ACV), frequentemente sob o termo ***Water Stress Index*** ou “Índice de Estresse Hídrico” – porém algumas vezes sob a denominação equivocada de pegada hídrica, conforme observado por Berger e Finkbeiner (2010). Hoekstra (2016) aponta que uma diferença fundamental entre a abordagem da ACV e a da pegada hídrica é a de que a realização de uma ACV envolve a ponderação dos impactos de uma dada atividade de acordo com sua relevância em escala local, regional ou nacional. Sendo assim, a ACV pressupõe que um dado volume de água consumido em uma região com escassez hídrica possui um impacto superior a um mesmo volume abstraído de um local com relativa abundância do recurso. Em contraste, a metodologia da pegada hídrica não realiza tal distinção sob o pressuposto de se tratar de um indicador da *pressão* sobre um recurso natural, e não de seu *impacto*, e da necessidade de se considerar os efeitos em escala global das demandas por recursos hídricos, independentemente do local de onde são aproveitados (HOEKSTRA, 2016).

Outros termos similares ao de pegada hídrica identificados por Bakken *et al.* (2014) incluem “consumo de água”, “perdas de água” e “abstração de água”. Tais autores observaram que estas expressões são utilizadas de maneira inconsistente na literatura produzida acerca do tema, e adotaram o termo “consumo de água” em referência ao volume de água que deixa o sistema em análise, e que consequentemente pode ser considerado perdido para usuários a jusante.

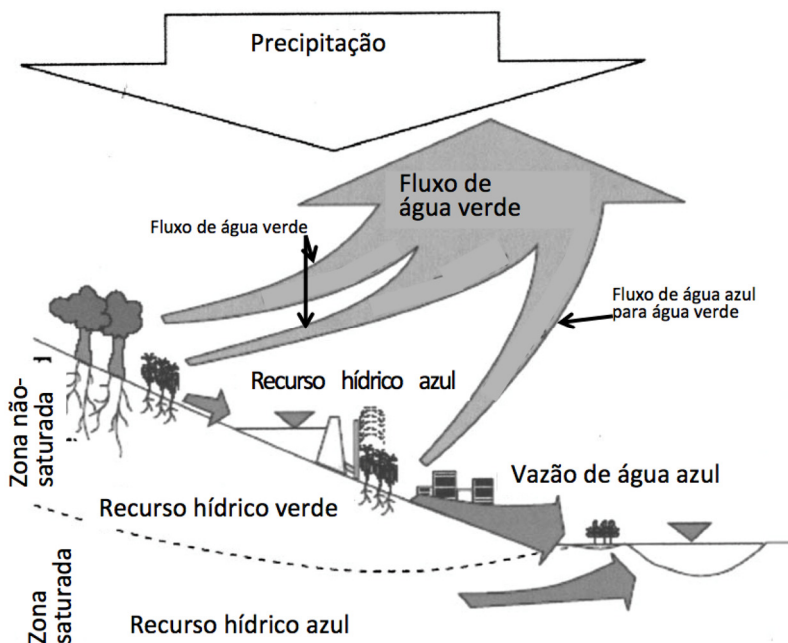
2.2.1. Classificação de acordo com o impacto no ciclo hidrológico

Hoekstra *et al.* (2011) apresentam a distinção da pegada hídrica em três categorias, de acordo com o impacto que possuem no ciclo hidrológico local e, consequentemente, para os usuários de recursos hídricos a jusante do ponto de interesse. O primeiro deles, pegada hídrica azul, consiste em um indicador de uso consuntivo da “água azul”, esta definida como a água doce subterrânea e a disponível em corpos d’água superficiais (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Considera-se “água verde” a “precipitação no continente que não escoou ou não repõe a água subterrânea, mas é armazenada no solo ou permanece temporariamente na superfície do solo ou na vegetação” (HOEKSTRA *et al.*, 2011). Deste modo, a pegada hídrica verde se relaciona ao consumo da água nesta etapa do ciclo hidrológico por determi-

nado processo produtivo, sendo principalmente aplicável a atividades como agricultura e a silvicultura. A figura 2 ilustra a distinção entre os chamados recursos hídricos verdes e os recursos hídricos azuis no ciclo hidrológico.

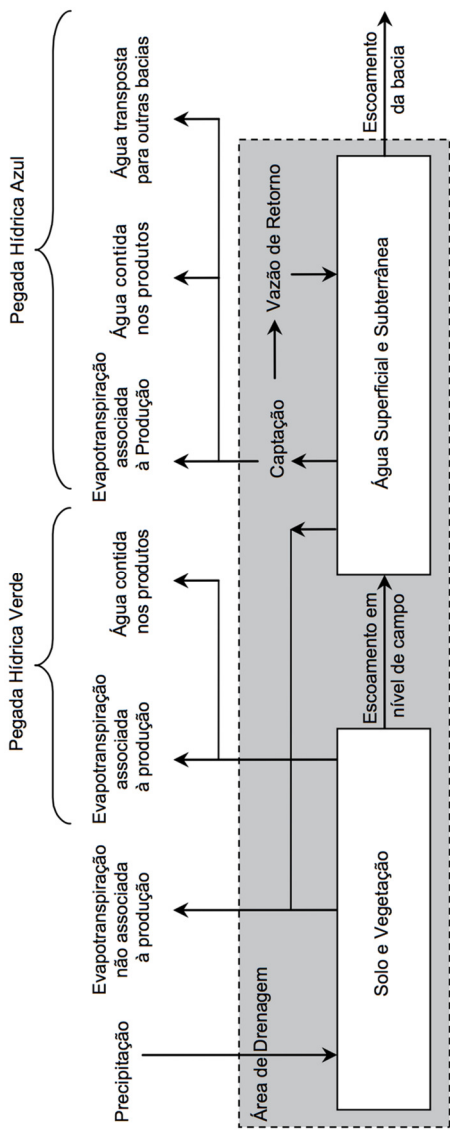
Figura 2 – Diferenciação entre recursos hídricos azuis e recursos hídricos verdes no ciclo hidrológico.



Fonte: adaptado de Falkenmark e Rockström (2006).

A figura 3, por sua vez, esquematiza especificamente pegada hídrica verde e a pegada hídrica azul de atividades humanas em escala de bacia hidrográfica.

Figura 3 – A inserção da pegada hídrica azul e a pegada hídrica verde no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.



Fonte: adaptado de Hoekstra *et al.* (2011).

A pegada hídrica cinza reflete os efeitos de uma determinada atividade sobre a disponibilidade de água em uma dada região devido ao comprometimento de sua qualidade. A definição dada por Hoekstra *et al.* (2011) consiste no “volume de água necessário para assimilar a carga de poluentes baseado nas concentrações em condições naturais e nos padrões ambientais existentes”. Segundo Ferreira (2014), pode-se considerar tal conceito análogo ao de vazão de diluição, proposto por Kelman (1997 apud CRUZ, 2001) e aplicado em âmbito brasileiro para a estimativa de vazões de outorga a serem concedidas para lançamentos de efluentes em cursos d’água (ANA, 2013).

2.2.2. Classificação de acordo com a escala analisada

Além da classificação previamente mencionada, a pegada hídrica pode ser diferenciada de acordo com a escala analisada (HOEKSTRA *et al.*, 2011), sendo esta:

- Um produto;
- Um consumidor;
- Uma comunidade;
- Um país;
- Uma empresa;
- Uma região geográfica.

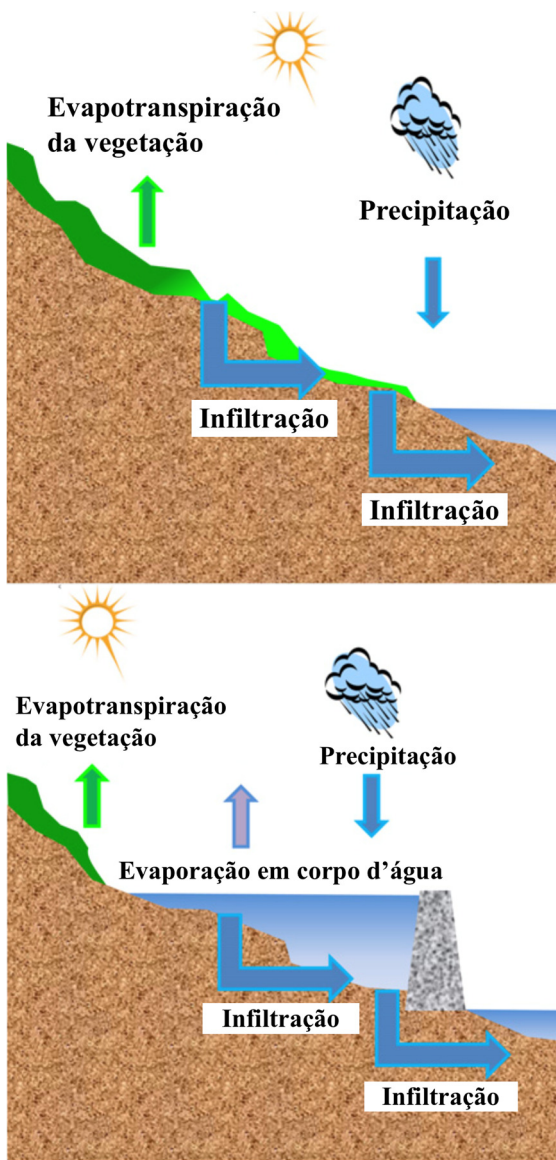
2.3 A PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA

Dentro dos usos consuntivos de água azul relacionados na seção 2.2, dois podem ser associados à operação de barragens: a evaporação da água e a restituição desta em um período distinto do qual foi retirada, ambos devido ao fato de estarem frequentemente associados à implantação de reservatórios de regularização. O fato destes possuírem áreas superficiais superiores às das respectivas calhas originais dos rios resulta, de modo geral, em um aumento da evaporação em relação ao período prévio aos alagamentos (TORCELLINI *et al.*, 2004). Adicionalmente, uma vez represada, a água tende a passar por uma elevação de temperatura (WILSON *et al.*, 2012), o que tende a alterar a intensidade da evaporação (COOLEY *et al.*, 2011). Tais perdas por evaporação são consideradas o principal componente da pegada hídrica de UHE e PCH (HOEKSTRA *et al.*, 2011), e Bakken *et al.* (2013) relataram que os estudos realizados acerca do tema até então haviam se restringido a este

aspecto. Cooley *et al.* (2011) destacam que o uso consuntivo de recursos hídricos por aproveitamentos hidrelétricos possui uma complexa dependência de fatores como o clima, a localização e o projeto e operação dos reservatórios.

Herath *et al.* (2011) argumentam que, em teoria, a fração de água que percola no leito do reservatório poderia também ser considerada uma perda. Entretanto, os mesmos autores esclarecem que tal fração possui grande probabilidade de permanecer na mesma bacia hidrográfica, alimentando mananciais de água subterrânea ou se tornando novamente disponível na superfície a jusante, conforme também considerado por Gleick (1992). Deste modo, Herath *et al.* (2011) concluem que seria inapropriado considerá-la como uma perda verdadeira para fins de estimativa de pegada hídrica. Os efeitos da construção de reservatórios artificiais na paisagem e no ciclo hidrológico são resumidos na figura 4.

Figura 4 – Componentes selecionados do ciclo hidrológico antes e após a construção de um reservatório.



Fonte: adaptado de Herath *et al.* (2011)

Diversos estudos vem sendo publicados em âmbito internacional com o objetivo de fornecer estimativas quantitativas do consumo de água relativo à geração de energia elétrica. Entretanto, publicações como IEA (2012), apesar de reconhecerem o impacto de aproveitamentos hidrelétricos sobre a disponibilidade de recursos hídricos, se abstêm de qualquer quantificação sob a justificativa de que não há consenso quanto à abordagem a ser adotada para este fim, conforme será discutido adiante. Outros trabalhos tem reconhecido a complexidade envolvida na desagregação e alocação das parcelas de evaporação em reservatórios a outros usos, como irrigação, controle de inundações e abastecimento municipal (EPRI, 2002; TORCELLINI *et al.*, 2004; COOLEY *et al.*, 2011). Uma proposta em tal sentido foi realizada por Pasqualetti e Kelley (2008), que sugeriram que tal alocação seja linearmente proporcional ao valor econômico estimado para cada uso. No caso em particular abordado pelos autores, concluiu-se que o valor – e consequentemente o volume de água evaporado – a ser alocado à geração de energia era de 55% do total.

Wilson *et al.* (2012) realizaram um abrangente estudo com o objetivo de estimar valores de pegada hídrica da geração de energia nos Estados Unidos de acordo com diferentes fontes. Uma das principais distinções deste trabalho é a consideração da pegada hídrica cinza de todas as fontes de energia consideradas, a qual provou ser superior à pegada hídrica azul em uma ou duas ordens de grandeza de acordo com os critérios adotados pelos autores. Alguns dos resultados obtidos são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Médias das pegadas hídricas (PH) de acordo com a fonte de energia nos EUA, ponderadas pela produção de energia por estabelecimento.

Fonte	PH azul (m ³ GJ ⁻¹)	PH cinza (m ³ GJ ⁻¹)	PH total (m ³ GJ ⁻¹)
Carvão	0,32	7,19	7,51
Hidroeletricidade	0,64	30,82	31,46
Gás Natural	0,04	1,55	1,59
Nuclear	0,12	3,03	3,15
Geotérmica	2,10x10 ⁻³	0	2,10x10 ⁻³
Solar fotovoltaica	1,05x10 ⁻⁵	2,10x10 ⁻³	2,10x10 ⁻³
Eólica	2,10x10 ⁻⁵	2,10x10 ⁻³	1,05x10 ⁻³

Fonte: adaptado de Wilson *et al.* (2012)

Observa-se que existe uma diferença de até quatro ordens de grandeza entre as estimativas realizadas por Wilson *et al.* (2012) refe-

rentes a fontes como eólica, solar e geotérmica e as demais. As pegadas hídricas cinzas, apesar de possuírem valores consideravelmente superiores aos das respectivas pegadas hídricas azuis, foram consideradas pelos autores como uma parcela de uso não consuntivo. Wilson *et al.* (2012) justificam a adoção de um componente cinza particularmente à pegada hídrica da energia hidrelétrica pelo fato de que a água armazenada em reservatórios, assim como a utilizada para resfriamento em usinas termoeletricas, é afetada pela elevação da temperatura, redução da qualidade e perdas de biodiversidade.

Outra constatação relevante consiste no fato de que a pegada hídrica da energia hidrelétrica é consideravelmente superior às das demais fontes, tanto no total quanto se analisados os componentes individuais azul e cinza. Deve-se ressaltar que, no referido estudo, Wilson *et al.* (2012) optaram por alocar à geração de energia apenas a metade dos valores das pegadas hídricas estimadas para os reservatórios, atribuindo a outra metade a seus demais usos, como irrigação, abastecimento urbano e recreação – adotando assim um critério próximo ao de Pasqualetti e Kelley (2008). Por fim, Wilson *et al.* (2012) observaram a complexidade de comparação entre as pegadas hídricas de diferentes fontes de energia, dado que as perdas de algumas são medidas e as de outras (incluindo a hidrelétrica) são oriundas de modelagem. Devido a tal fator, os autores recomendaram que estudos no tema apresentem definições claras quanto aos limites do sistema considerado e se consumos indiretos foram ou não contabilizados.

Berger e Finkbeiner (2010) observam que métodos mais avançados para a estimativa da pegada hídrica da geração de energia hidrelétrica requerem dados de alta resolução, e portanto a escolha dos procedimentos a serem empregados depende de um compromisso entre precisão e aplicabilidade. Considera-se esta observação particularmente relevante no contexto da abordagem de diversos reservatórios com características particulares, conforme será abordado na seção 3.2.

O cálculo da pegada hídrica da geração de energia elétrica adotado por Mekonnen e Hoekstra (2012) é dado pela fórmula (1):

$$PH = \frac{AET}{EG} \quad (1)$$

onde PH corresponde à pegada hídrica associada à geração de energia hidrelétrica por um dado aproveitamento (m^3GJ^{-1}); AET é a evaporação anual de água de um reservatório após a inundação da área (m^3ano^{-1} ou

$\text{m}^3\text{mês}^{-1}$); e EG é a energia produzida pela unidade geradora associada ao reservatório considerado (GJ ano^{-1} ou GJ mês^{-1}).

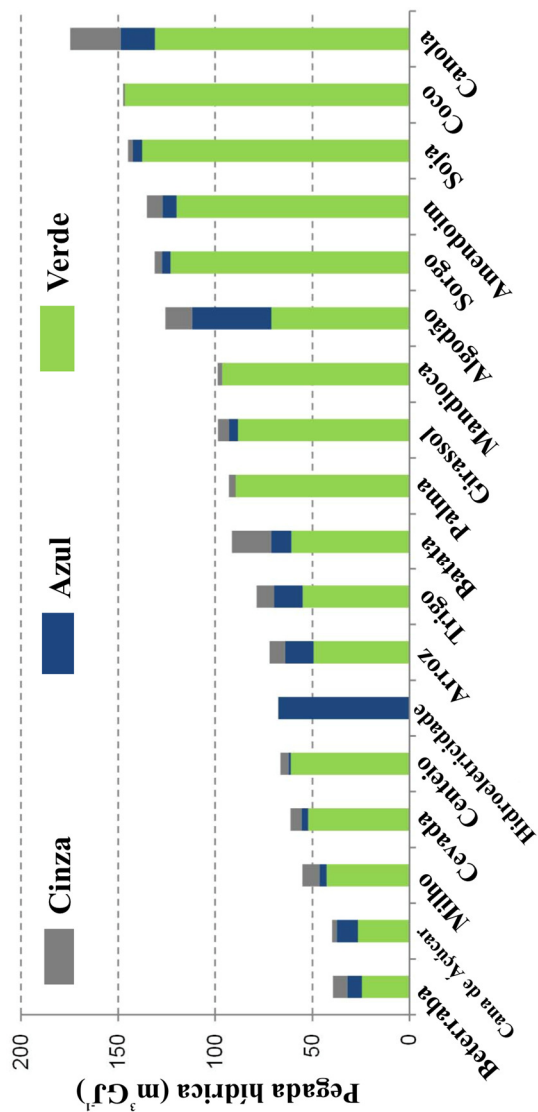
Adotando-se a metodologia de Mekonnen e Hoekstra (2012), a pegada hídrica relacionada aos reservatórios utilizados para geração de energia elétrica está essencialmente associada à água azul, o que diferencia este tipo de energia da oriunda de biocombustíveis, por exemplo, conforme ilustrado na figura 5.

É importante ressaltar que há divergências quanto ao método para estimativa da pegada hídrica de aproveitamentos hidrelétricos. Bakken *et al.* (2013) sugerem que a relação representada pela fórmula (1) consiste em um indicador do “consumo bruto de água”, argumentando que esta seja aplicável somente a casos nos quais:

- um único reservatório está associado a uma unidade geradora de energia e
- o conjunto reservatório e unidade geradora é definido como o limite do sistema em análise.

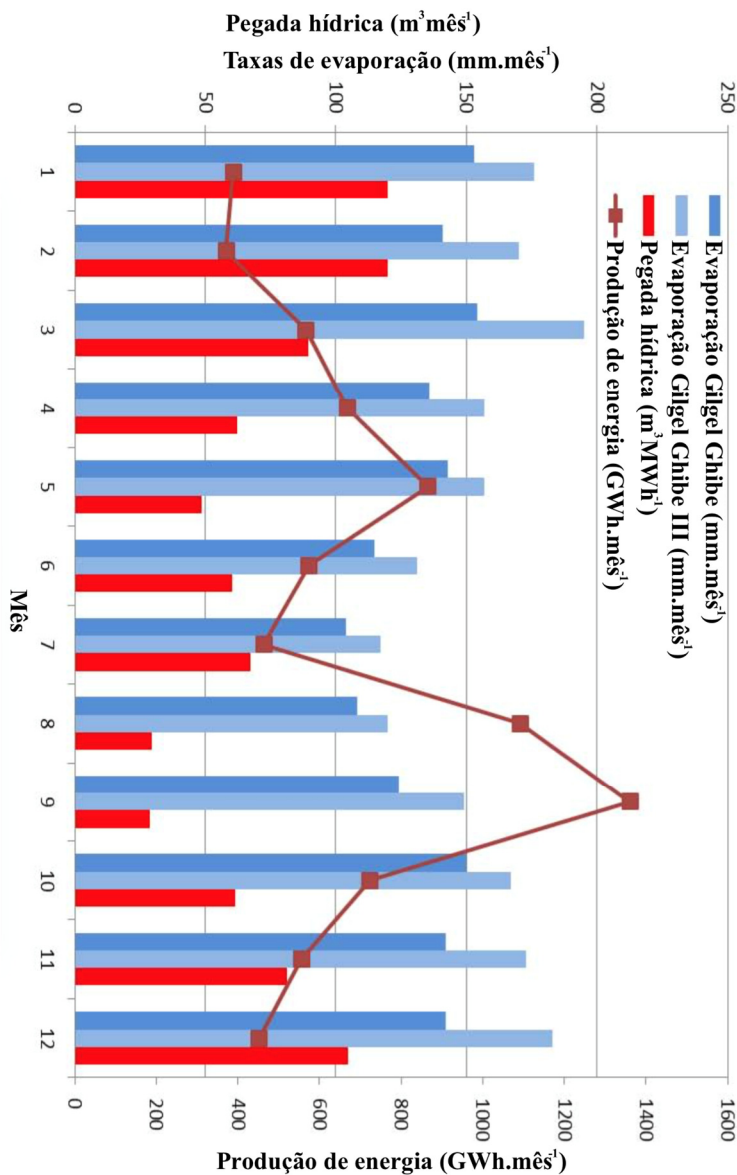
Bakken *et al.* (2013) argumentam que é comum, em determinadas regiões do mundo, a existência de situações onde ocorrem diversos reservatórios e estações em sequência. Nestes casos, ocorreria maior complexidade em determinar com precisão os limites do sistema e em associar o volume de água evaporado em um reservatório à energia gerada em uma estação específica – tal é o caso de sistemas como Salto, Jacuí e Cedro/Palmeiras, abordados na seção 3.2. Adicionalmente, Bakken *et al.* (2013) apontam que a resolução temporal adotada pode afetar significativamente as estimativas de pegada hídrica obtidas. Especificamente, a utilização de médias anuais tende a amortecer as variações tanto na produção de energia quanto na evaporação em um dado reservatório e, conseqüentemente, na pegada hídrica estimada. Tal constatação é evidenciada no estudo de Yesuf (2012 apud BAKKEN *et al.*, 2013) e ilustrada na figura 6.

Figura 5 – Comparação entre as composições e entre os valores das pegadas hídricas médias globais para geração de energia hidrelétrica e a partir de fontes selecionadas de biomassa.



Fonte: adaptado de Mekonnen e Hoekstra (2012).

Figura 6 – Geração de energia, evaporação e pegada hídrica mensal de dois reservatórios associados a duas usinas hidrelétricas na Etiópia.



Fonte: adaptado de Yesuf (2012) *apud* Bakken *et al.* (2013).

Contextos adicionais nos quais ocorrem incertezas envolvendo a quantificação da pegada hídrica da geração de energia hidrelétrica envolvem, por exemplo, a utilização de lagos naturais como reservatórios. Neste caso, comum em países como a Noruega, Bakken *et al.* (2013) observam que não há incrementos significativos na evaporação como consequência do aproveitamento de gradientes de altitude preexistentes para fins de geração de energia. Sendo assim, os autores questionam a fórmula (1) por esta negligenciar as evidentes diferenças entre situações como a descrita e outras onde a superfície de evaporação na região considerada era consideravelmente inferior previamente à implantação dos aproveitamentos. Por fim, Bakken *et al.* (2013) observam que a fórmula proposta por Mekonnen e Hoekstra (2012) ignorar a frequente situação em que um reservatório possui múltiplas finalidades, conforme previamente elucidado.

Neste contexto, são apresentadas duas fórmulas alternativas para a estimativa da pegada hídrica em reservatórios identificadas na revisão bibliográfica conduzida por Bakken *et al.* (2013). A primeira, cunhada pelas autoras como “consumo líquido de água”, consiste em uma modificação da fórmula proposta por Mekonnen e Hoekstra (2012) de modo a contabilizar o fato de que, previamente à instalação de um reservatório, já ocorria evapotranspiração na superfície em questão. Neste caso, as perdas de água associadas à geração de energia hidrelétrica correspondem ao incremento na transferência de água para a atmosfera (devido à existência de um espelho d’água) em relação ao cenário anterior, conforme explicitado na fórmula 2. Conforme previamente destacado, além do incremento da superfície de evaporação, a construção de reservatórios em geral resulta em consideráveis aumentos na temperatura da água – e, portanto, sua taxa de evaporação – em relação à de rios com regime natural de vazões (WILSON *et al.*, 2012).

$$PH = \frac{AET - AET_{pré,V}}{EG} \quad (2)$$

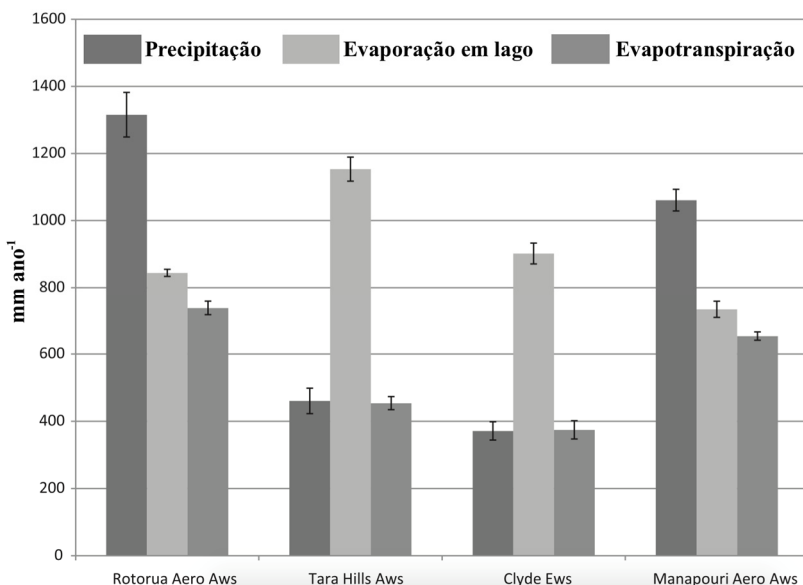
onde $AET_{pré,V}$ corresponde à evapotranspiração de água de um reservatório da inundação da área (m^3ano^{-1} ou $m^3mês^{-1}$). A expressão $AET - AET_{pré,V}$ pode ser associada ao conceito de “evaporação líquida” utilizada em estudo conduzido pelo ONS (2004), onde tal subtração foi calculada para posterior utilização na reconstituição de vazões naturais em bacias hidrográficas nas quais há aproveitamentos hidrelétricos.

Uma segunda alternativa de cálculo baseia-se nos efeitos, sobre o balanço hídrico local, da construção de um reservatório. Tal abordagem, proposta por Herath *et al.* (2011) considera o armazenamento de água oriunda da precipitação direta sobre o reservatório, conforme explicitado na fórmula 3:

$$PH = \frac{AET - P_V}{EG} \quad (3)$$

Onde P_V corresponde à precipitação anual direta sobre o reservatório (m^3ano^{-1}). Observa-se que este último método de cálculo produz valores negativos para a pegada hídrica de reservatórios localizados em áreas nas quais a precipitação média anual excede a evaporação, como as localidades de Rotorua e Manapouri, na Nova Zelândia, conforme ilustrado na figura 7. Considerando-se que os valores médios anuais para a precipitação e evapotranspiração frequentemente são da mesma ordem de grandeza que os da evaporação, verifica-se que a escolha do método de cálculo utilizado possui elevada influência na magnitude dos valores estimados para a pegada hídrica.

Figura 7 – Precipitação, evaporação e evapotranspiração em quatro localidades na Nova Zelândia.



Fonte: adaptado de Herath *et al.* (2011)

Herath *et al.* (2011) geraram estimativas da pegada hídrica média de usinas hidrelétricas na Nova Zelândia a partir das equações (1), (2) e (3), obtendo valores respectivos de $6,05 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, $2,72 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ e $1,55 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$. Tal variação indica a grande sensibilidade das estimativas à metodologia adotada para sua elaboração.

Gleick (1992) realizou um estudo com o objetivo de caracterizar e quantificar impactos ambientais de aproveitamentos hidrelétricos nos EUA e correlacioná-los às respectivas características de projeto. Um dos impactos considerados consiste nas perdas evaporativas nos lagos decorrentes dos barramentos. Primeiramente, o autor observou que existe grande variabilidade entre as áreas alagadas para produzir uma dada quantidade de energia, tendo o aproveitamento mais eficiente sob este aspecto uma um desempenho cerca de 5.800 vezes^2 superior ao de menor performance. Adicionalmente, concluiu-se que aproveitamentos

² Os valores indicados por Gleick (1992) foram de 10 a $58.000 \text{ km}^3 \cdot 10^{-18} \text{ J} \cdot \text{ano}^{-1}$

hidrelétricos de menor porte (em termos de capacidade instalada) tendem a apresentar maiores perdas evaporativas por unidade de energia produzida que os de maior porte, mesmo não se utilizando especificamente o termo pegada hídrica. Entretanto, o mesmo estudo indica que características construtivas de cada UHE, especialmente a diferença entre a altura da barragem e a queda bruta, são um critério superior à capacidade instalada dos aproveitamentos em termos de correlação com os chamados “custos ambientais” (GLEICK, 1992).

Wilson *et al.* (2012) relataram haver evidências de que empreendimentos hidrelétricos no Oeste dos Estados Unidos possuam uma pegada hídrica média aproximadamente 77% inferior à dos aproveitamentos localizados no leste do país. Tal constatação indica a possibilidade de significativas influências da topografia e do clima local nas pegadas hídricas de diferentes aproveitamentos. Devido à variedade climática e ambiental no território brasileiro, tal hipótese pode ser também verdadeira no Brasil.

Bueno (2015) estimou as pegadas hídricas para 20 usinas hidrelétricas de grande porte localizadas no território brasileiro de acordo com as fórmulas (1) e (2). Observaram-se diferenças significativas nos valores produzidos pelas duas fórmulas, de modo similar ao relatado por Herath *et al.* (HERATH *et al.*, 2011). Verificou-se também grande variabilidade nas estimativas referentes a diferentes aproveitamentos, a qual foi atribuída tanto à amplitude de áreas superficiais dos reservatórios quanto a diferenças na produção de energia pelos aproveitamentos. Os valores médios estimados pelas fórmulas (1) e (2) foram de $82 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ e $33 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, respectivamente.

2.4 EVAPORAÇÃO EM LAGOS E O ALGORITMO WREVAP

Conforme abordado na seção anterior, a evaporação em um reservatório consiste em um parâmetro crucial para a determinação da pegada hídrica de um determinado aproveitamento hidrelétrico por ser considerada a principal fonte de perdas para tal fonte de energia. Além de sua relevância em termos de alterações do ciclo hidrológico e disponibilidade hídrica, ressalta-se que tais perdas de água correspondem a reduções no potencial de energia a ser gerada, tornando-se assim objeto de atenção também por este motivo, principalmente em cenários de crise energética (ONS, 2004). Trata-se de um fator adicional para o interesse, por parte de operadores de empreendimentos de geração de energia hidrelétrica, na estimativa acurada das perdas por evaporação.

No presente contexto, o fenômeno da evaporação pode ser definido como a “mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta” (ONS, 2004). Sendo assim, a intensidade de sua ocorrência está relacionada a fatores como a temperatura e a umidade do ar acima da superfície de evaporação e à insolação. Dingman (1994) fornece uma descrição dos principais fenômenos e variáveis envolvidos no processo de evaporação em corpos d’água, a qual é ilustrada na figura 8.

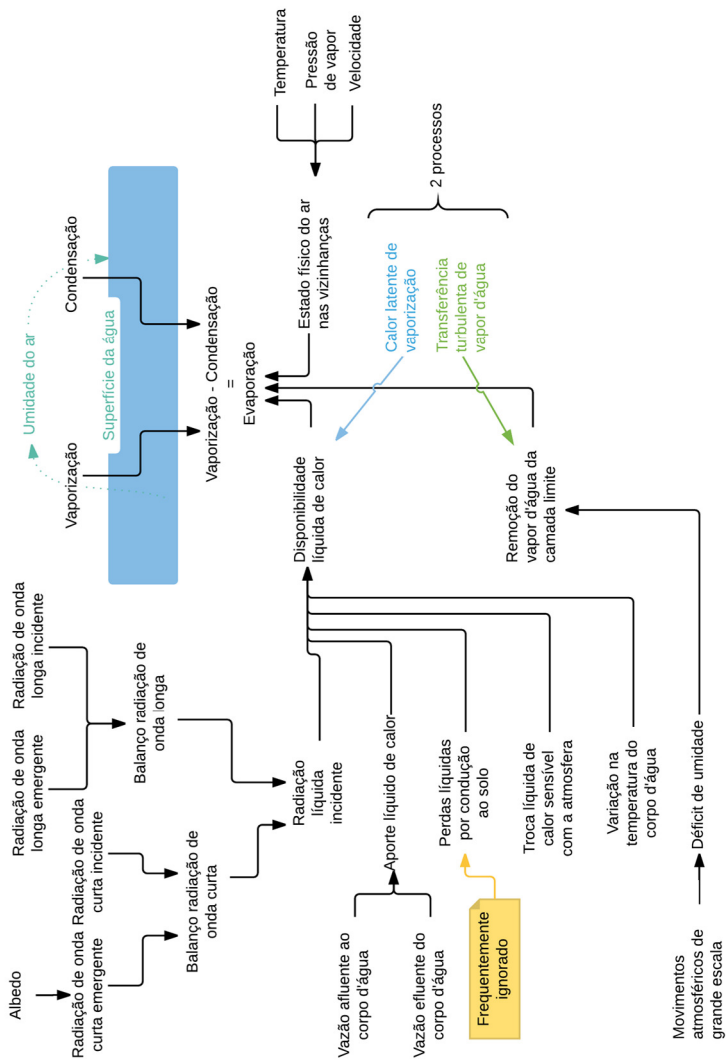
De acordo com Cooley *et al.* (2011) as perdas evaporativas de aproveitamentos hidrelétricos são altamente variáveis e dependem de diversas características locais, como:

- Área alagada;
- Profundidade do reservatório;
- Temperatura da água;
- Condições climáticas.

Em 2004, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) publicou um estudo contendo estimativas de médias mensais de evaporação líquida em reservatórios de usinas hidrelétricas implantadas e previstas, a partir da interpolação de séries históricas de dados meteorológicos coletados por estações distribuídas no território nacional (ONS, 2004). No referido documento, também se reconheceram as influências das variáveis mencionadas por Cooley *et al.* (2011). A partir de tal constatação, optou-se pela adoção de um modelo baseado na teoria da relação complementar – *Complementary Relationship Lake Evaporation* (CRLE) – a qual será abordada em maior detalhe adiante. A escolha também foi baseada na sólida fundamentação teórica do referido modelo e no fato de que suas estimativas haviam sido amplamente e independentemente testadas.

As estimativas obtidas no estudo do ONS (2004) vêm sendo utilizadas para estudos de recomposição de vazões, conforme mencionado na seção 2.3. Tais valores são constantes para cada mês do ano e localidade, partindo-se da premissa de que o volume evaporado em reservatórios depende primariamente da radiação à qual a superfície deste é exposta, sendo negligenciável a variação interanual desta variável.

Figura 8 – Principais fatores envolvidos no fenômeno da evaporação



Elaborado a partir da descrição de Dingman (1994) e McMahon *et al.* (2013a)

Cabe mencionar que, conforme relatado por McMahon *et al.* (2013a) e abordado em maior detalhe por MCVICAR *et al.* (2012), diversos estudos tem identificado uma tendência de redução nas evaporações de tanque medidas em diferentes países, hipoteticamente associada a mudanças climáticas. Tal tendência havia sido abordada por Brutsaert e Parlange (1998), que utilizaram precisamente a relação para deduzir que esta seria uma estimativa de que as evaporações reais nestas regiões estariam de fato aumentando, resolvendo assim o chamado “paradoxo da evaporação”. Independentemente de sua natureza, despreende-se que a evaporação poderá vem sofrendo alterações significativas em decorrência de mudanças climáticas, as quais devem continuar ao longo das próximas décadas. Entretanto, devido à complexidade e incerteza inerentes a tal consideração, esta não foi incluída no escopo do presente estudo.

Morton (1983b) apresentou o programa CRLE em código FOR-TAN. Este consiste em uma modificação do CRAE (*Complementary Relationship Aerial Evapotranspiration*), utilizado para geração de estimativas de evapotranspiração (MORTON, 1983a), de modo a considerar diferenças entre propriedades físicas de superfícies terrestres e da água – tal modelo será abordado em maior detalhe na seção 3.3.1. Adicionalmente, acrescentou-se um algoritmo com o objetivo de representar o armazenamento de energia através do *routing*, analogamente aos métodos empregados para simular o armazenamento de água em reservatórios. Morton (1986) apresentou uma versão atualizada do modelo CRLE, que passou a ser aplicável a lagos de maior profundidade (superior a 150 m) através do emprego da substituição da evaporação de lago pela radiação global absorvida como objeto do *routing*. O CRAE, CRLE e o CRWE (*Complementary Relationship Wet-Surface Evaporation*) foram compilados em um único programa, denominado WREVAP (MORTON, 1985 apud MORTON, 1986). Este foi utilizado por McMahon *et al.* (2013a), que o disponibilizou em linguagem FORTRAN e como arquivo executável (MCMAHON *et al.*, 2013b).

McMahon *et al.* (2013a) conduziram uma extensa avaliação da aplicabilidade de 18 modelos e adaptações de modelos para estimativas de evaporação em diversos ambientes. Os autores observaram que o amplamente empregado modelo de Penman (1948) é preferível ao WREVAP apenas para corpos d’água com profundidade inferior a 2 m. De fato, considerou-se o WREVAP como a alternativa mais adequada entre todas as analisadas para estimativas de evaporação em corpos d’água com profundidade superior a 2 m (MCMAHON *et al.*, 2013a), como os considerados no presente estudo.

Destaca-se que o trabalho de Mekonnen e Hoekstra (2012) foi elaborado a partir de estimativas de evaporação geradas pela equação de Penman-Monteith baseada na temperatura de equilíbrio (McJannet et al., 2008 apud MEKONNEN e HOEKSTRA, 2012), também considerada apropriada, por McMahon *et al.* (2013a), para a estimativa da evaporação em reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos. McMahon *et al.* (2013a) estão de acordo com o uso desta equação para tal propósito, entretanto não a consideram uma opção preferível entre as demais, sendo este o caso do WREVAP. Conforme salientado por Morton (1983b), algumas das principais vantagens do emprego de modelos baseados na relação complementar são:

- A necessidade de uma quantidade relativamente reduzida de variáveis com séries históricas (insolação, temperatura do ar e umidade do ar);
- A possibilidade de aplicação a ambientes significativamente distintos sem a necessidade de otimização de coeficientes;
- O fato de serem fisicamente fundamentados e, portanto, adaptáveis a circunstâncias incomuns;
- A possibilidade de uso das mesmas séries históricas (em um modelo muito similar) para estimativas da evapotranspiração na área alagada pelo reservatório caso este não houvesse sido executado. Tal vantagem é particularmente relevante no caso de se empregar a fórmula (2) para a estimativa de pegada hídricas.

Além do exposto acima, ressalta-se o emprego prévio do modelo WREVAP pelo ONS (2004) para a realização de estimativas de evaporação em hidrelétricas brasileiras conforme relatado anteriormente, possibilitando a comparação de resultados. Considerando-se os fatores acima mencionados, optou-se pela adoção do WREVAP como modelo para geração das séries históricas de evaporação a serem empregadas para estimativa das pegadas hídricas no presente trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O escopo do presente estudo abrange 41 aproveitamentos hidrelétricos localizados no território dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, incluindo suas divisas e fronteiras. A área total ocupada pelos três estados é de 576384,32 km² (SANTA CATARINA, 2007; IBGE, 2016a). A região possui clima predominantemente mesotérmico, caracterizado pela ocorrência de inverno e verão bem definidos. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, este se divide especificamente entre Cfa (com verão temperado) e Cfb (com verão quente), conforme ilustrado na figura 9. A ocorrência de outros tipos de clima na região sul do Brasil se restringe, em geral, a pequenas porções do estado do Paraná localizadas na divisa com o Mato Grosso do Sul e São Paulo.

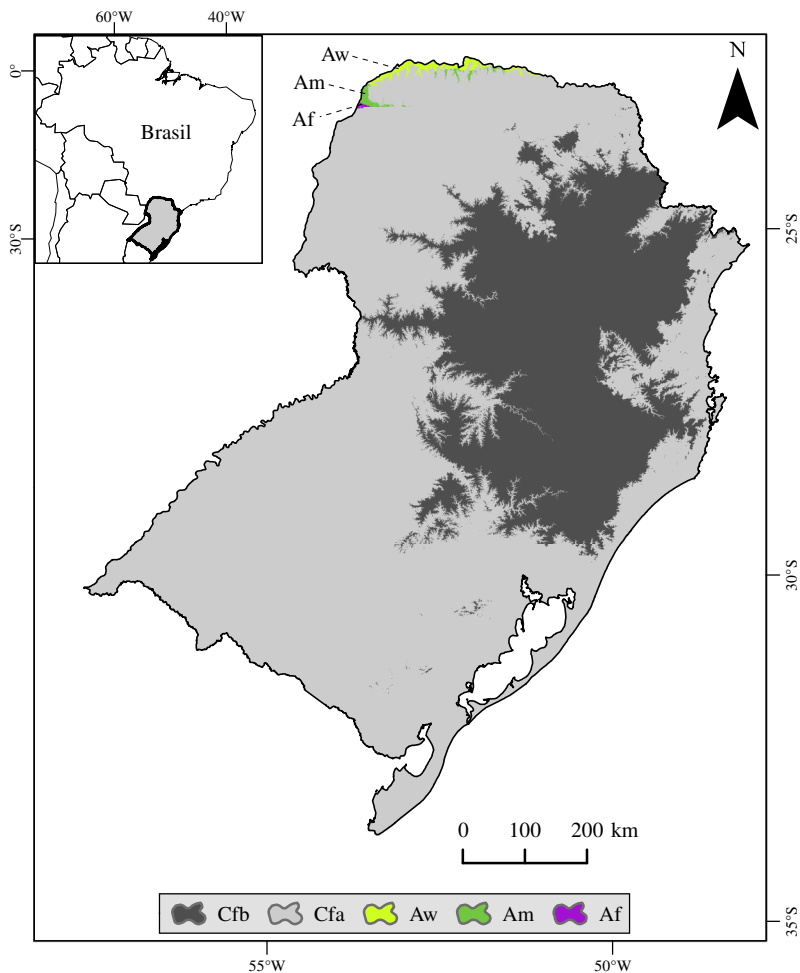
A precipitação média anual varia entre cerca de 1300 mm no extremo sul do Rio Grande do Sul e norte do Paraná a aproximadamente 2700 mm no litoral norte paranaense (CPRM, 2010). A formação rochosa da Serra Geral, presente nos três estados da região Sul, está associada a maiores altitudes e a climas mais amenos, sendo que sua extensão territorial coincide parcialmente com a da ocorrência de clima do tipo Cfb. A Serra Geral também consiste em um extenso divisor de águas, cujos corpos d'água a leste drenam majoritariamente ao oceano Atlântico.

O Rio Grande do Sul ocupa uma área de 281.730,22 km² (IBGE, 2016a). O estado possui como limites geográficos a Argentina a Oeste, o Uruguai ao Sul, o oceano Atlântico a Leste e o estado de Santa Catarina ao Norte. Seu relevo é marcado pela presença de planície ao longo do litoral, planaltos ao norte e oeste e depressão no centro do estado. O estado se divide em três principais regiões hidrográficas: a Bacia do Rio Uruguai, a Bacia do Guaíba e a Bacia do Litoral. Os principais rios do Rio Grande do Sul são: Camaquã, dos Sinos, Jacuí, Ijuí, Ibicuí e Jaguarão.

O estado de Santa Catarina abrange uma área total de 95.346,18 km². (SANTA CATARINA, 2007). Seu território possui as seguintes divisas: ao norte com o estado do Paraná, a oeste com o Paraguai, ao sul com o estado do Rio Grande do Sul, e ao leste com o Oceano Atlântico. A formação Serra Geral constitui um divisor de águas entre a chamada Vertente do Interior, abrangendo as porções das Regiões Hidrográficas do Paraná e do Uruguai inseridas no estado, e a Vertente do Atlântico, formado por bacias isoladas que desagüam direta-

mente no Oceano Atlântico, inseridas na Região Hidrográfica Atlântico Sul.

Figura 9 – Distribuição de climas no sul do Brasil de acordo com a classificação de Köppen-Geiger.



Nota: Cfb – Temperado úmido com verão ameno; Cfa – Subtropical com verão quente; Aw – Tropical com inverno seco; Am – Tropical subúmido ; Af – Tropical superúmido (terminologia EMBRAPA, 2016).

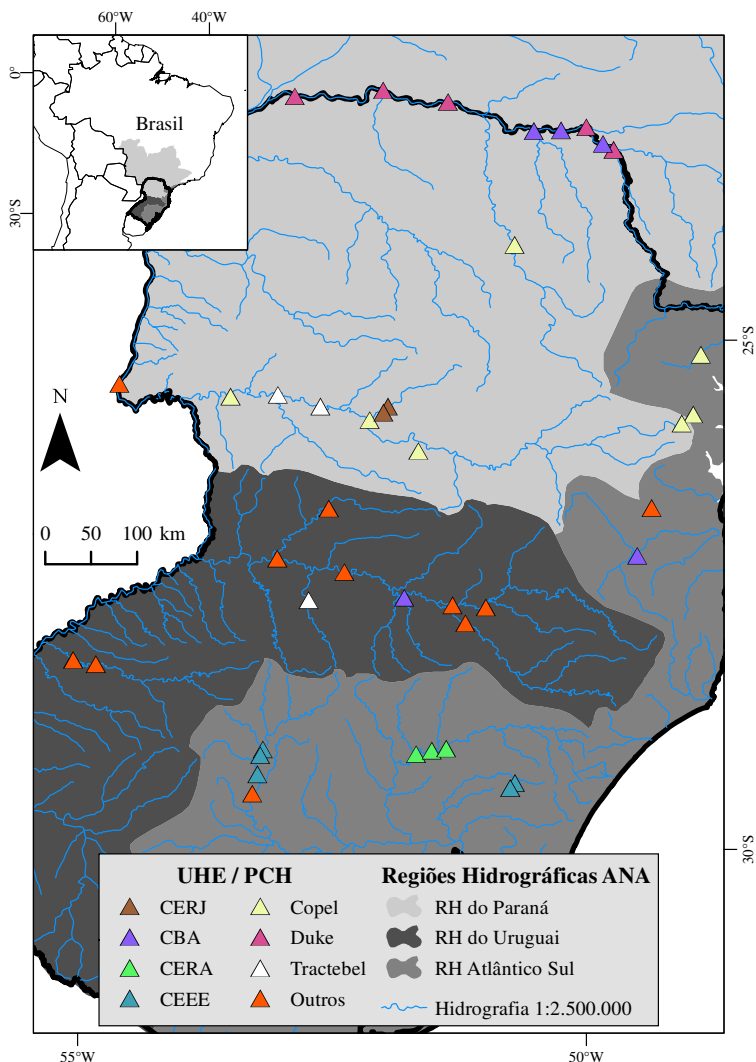
Fonte de dados: Alvares *et al.* (2013)

O estado do Paraná ocupa uma área de 199.307,92 km² (IBGE, 2016a), 97% da qual se localiza em altitudes superiores a 200 m. Seu clima possui contrastes, incluindo os tipos Cfa, Cfb e Cwa – este último marcado pela ocorrência de verões chuvosos e invernos secos. As temperaturas variam entre 14°C e 22°C. A precipitação média anual varia entre 1.500 mm e 2.500 mm. Suas unidades morfológicas se dividem em: Baixada Litorânea, Serra do Mar, Planalto Cristalino, Planalto Paleozoico e Planalto Basáltico (SANTOS *et al.*, 2006). Possui duas principais bacias hidrográficas: a Bacia do Paraná e a Bacia Litorânea.

A distribuição geográfica dos aproveitamentos hidrelétricos selecionados no presente estudo é apresentada na figura 10. Detalhes acerca destes aproveitamentos são apresentados no apêndice A. A área total alagada pelos reservatórios associados aos aproveitamentos hidrelétricos considerados no presente estudo é de aproximadamente 4284 km² (ANEEL, 20--; CEEE, 2011a; b; d; c; CELESC, 2016; EPE, 2016b), sendo que o reservatório da UHE Itaipu corresponde a cerca de um quarto deste total. Deve-se ponderar que a superfície de água disponível para evaporação – e, conseqüentemente, o volume evaporado – em um reservatório pode variar significativamente ao longo do tempo de acordo com a cota do nível d'água no mesmo, tanto devido a variações nas vazões afluentes quanto a possíveis deplecionamentos induzidos – estes últimos sendo o caso, por exemplo, da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Neto (LACTEC). Entretanto, **devido ao fato de tal variação ter sido desconsiderada na bibliografia consultada e à indisponibilidade de séries históricas do nível dos reservatórios, optou-se por adotar uma área superficial constante nas estimativas de volume evaporado a serem utilizadas.**

Considerou-se como sistema de cada aproveitamento a unidade geradora e o(s) reservatórios imediatamente a montante desta que não tenham sido alocados a outros sistemas. Os sistemas considerados no presente estudo são compostos, em sua predominância, por um reservatório associado a uma unidade geradora. Entretanto, existem contextos de sistemas de aproveitamentos associados a diversos reservatórios nos quais a adoção deste critério possuiu influência nos valores de pegada hídrica estimada, conforme discutido nas seções 3.2.1, 4.3.1 e 5.1.

Figura 10 – Distribuição geográfica de aproveitamentos hidrelétricos na região Sul do Brasil, destacando-se os principais operadores.



Nota: CERJ – Centrais Elétricas do Rio Jordão S/A; CBA – Companhia Brasileira do Alumínio; CERA – Companhia Energética Rio das Antas; CEEE – Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica; Copel – Copel Geração e Transmissão S/A; Duke – Duke Energy International; Tractebel – Tractebel Energia S/A; RH – Região Hidrográfica

Fontes de dados: ANEEL (2015b) (localização e operadores de aproveitamentos), ANA (2015) (regiões hidrográficas) e BRASIL (2016) (hidrografia).

3.2 CASOS PARTICULARES DE APROVEITAMENTOS

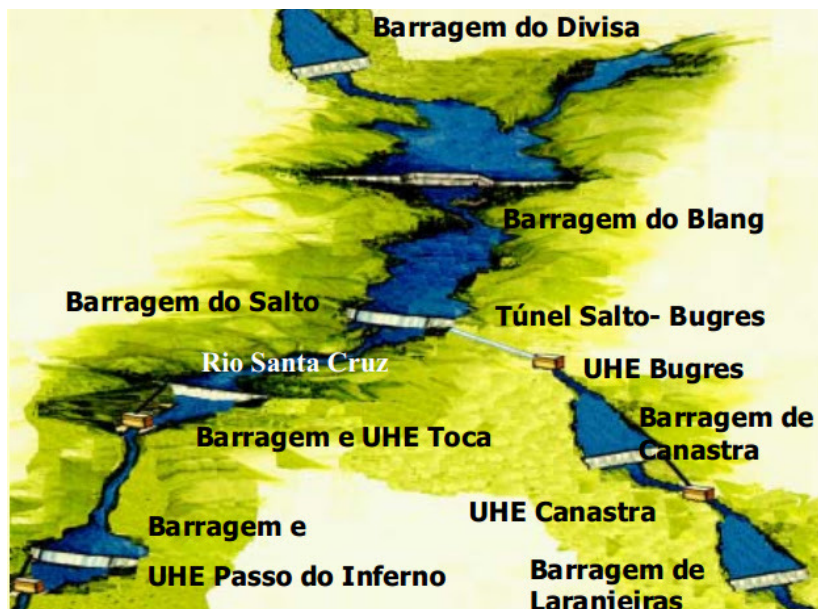
Considerando-se que um dos objetivos do presente estudo consiste em identificar possíveis correlações entre características de aproveitamentos hidrelétricos e suas respectivas pegadas hídricas, é necessário explicitar a ocorrência de casos particulares entre as usinas e reservatórios selecionados para o trabalho, que podem vir a possuir influências significativas sobre as estimativas de pegadas hídricas geradas. Trata-se de duas categorias principais, conforme descrito nos itens a seguir.

3.2.1. Aproveitamentos associados a múltiplos reservatórios

Conforme relatado na seção 2.3, uma das complexidades observadas por Bakken *et al.* (2013) consiste na alocação de evaporações em conjuntos de aproveitamentos associados a múltiplos reservatórios. No presente estudo, tal cenário evidenciou-se no chamado Sistema Salto. O sistema é composto por cinco aproveitamentos: UHE Toca, UHE Herval, UHE Passo do Inferno, UHE Bugres e UHE Canastra, estando os dois últimos incluídos no escopo do presente trabalho devido à disponibilidade de séries históricas de geração. Tal sistema se localiza na serra do Rio Grande do Sul, e é ilustrado na figura 11.

Neste caso, optou-se pelo critério de associar a cada aproveitamento as evaporações em todos reservatórios localizados entre este e a UHE ou PCH imediatamente a montante, caso exista. Deste modo, à UHE Bugres associaram-se as evaporações nos reservatórios Divisa (2,29 km²) (CEEE, 2011b), Blang (7,9 km²) (CEEE, 2011a) e Salto (2,5 km²) (CEEE, 2011d); e à UHE Canastra atribuiu-se a evaporação na barragem Canastra (0,05 km²) (CEEE, 2011c). Conforme será explicitado na seção 4.3, a adoção de tal critério resultou em uma pegada hídrica para esta último aproveitamento significativamente inferior à da maior parte das outras unidades geradoras consideradas no presente estudo.

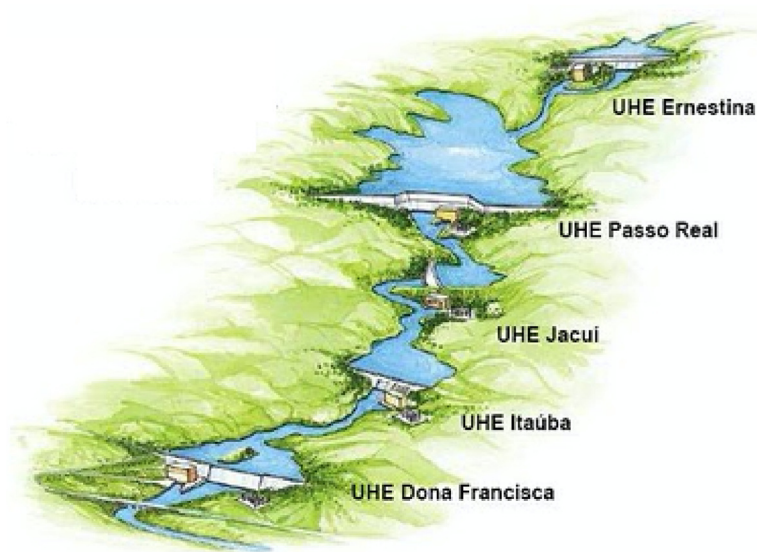
Figura 11 – Sistema Salto de aproveitamentos hidrelétricos.



Fonte: Geraldi (20--)

Também localizado no Rio Grande do Sul, o sistema Jacuí abrange as usinas hidrelétricas de Ernestina, Jacuí, Itaúba, Passo Real e Dona Francisca, tendo as quatro últimas sido consideradas no presente trabalho. Neste caso, trata-se de um sistema com configuração linear, conforme ilustrado na figura 12. Sendo assim, optou-se por desprezar os possíveis efeitos de regulação exercidos por um dado reservatório em aproveitamentos que não o localizado imediatamente a jusante deste. Logo, a cada UHE alocou-se 100% da evaporação do respectivo reservatório imediatamente a montante.

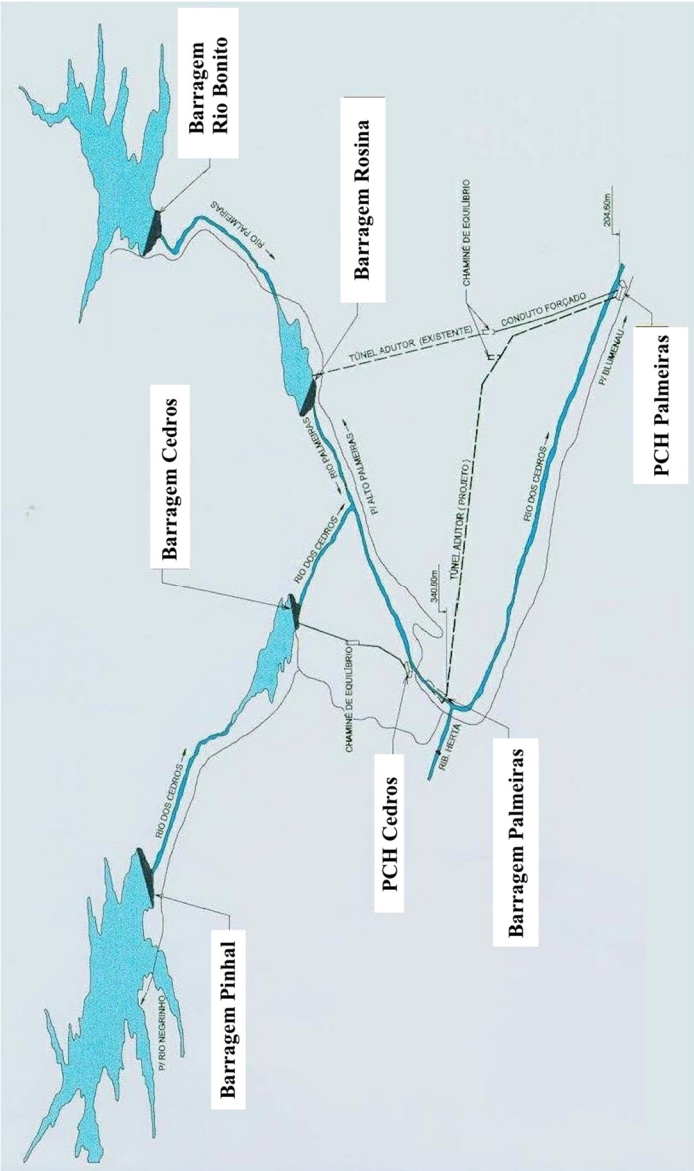
Figura 12 – Sistema Jacuí de aproveitamentos hidrelétricos.



Fonte: Santos (2012)

Um terceiro exemplo de associação de múltiplos reservatórios a aproveitamentos hidrelétricos consiste no sistema Cedros/Palmeiras, ilustrado na figura 13. Este envolve dois aproveitamentos e cinco barragens, três das quais estão conectadas direta ou indiretamente à usina Palmeiras, incluída no presente estudo: Rio Bonito (de acumulação – $3,9 \text{ km}^2$), Rosina (de captação – $0,04 \text{ km}^2$) e do canal de fuga a jusante da PCH Cedros (de captação – $0,005 \text{ km}^2$) (CELESC, 2016). Devido a sua pequena área alagada, optou-se por desconsiderar as evaporações neste último reservatório, alocando-se as dos demais à PCH Palmeiras.

Figura 13 – Sistema Cedros/Palmeiras de aproveitamentos hidrelétricos.



Fonte: adaptado de CELESC (2016)

3.2.2. Aproveitamentos com elevada queda de projeto

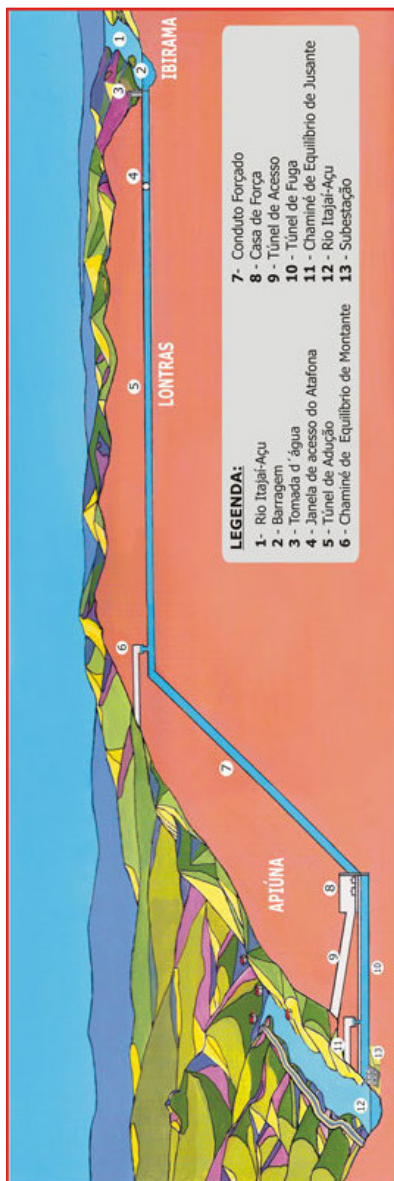
Certos aproveitamentos hidrelétricos funcionam envolvendo a utilização de túneis para condução da água a conjuntos turbina-gerador em cotas diversas dezenas de metros abaixo do pé das barragens, envolvendo em certos casos a transposição de bacias hidrográficas. Nestas situações, é frequente que a proporção entre as quedas brutas e as alturas das barragens associadas aos respectivos aproveitamentos seja excepcionalmente elevada. Consequentemente, existe uma tendência de que a quantidade de energia gerada seja consideravelmente superior à média para aproveitamentos com reservatórios de dimensões semelhantes³.

Tal é o caso da UHE Salto Pilão, com 191,89 MW de potência instalada, localizado em Santa Catarina, cujo lago abrange áreas dos municípios de Ibirama e Lontras, e cuja casa de máquinas se situa em Apiúna (ANEEL), conforme ilustrado na figura 6. Esta possui um vertedouro com altura de 3 metros e um reservatório com área alagada de aproximadamente 0,15 km² (CONSÓRCIO EMPRESARIAL SALTO PILÃO, 20---b) e cota máxima normal de 319 m acima do nível médio do mar (BRASIL, 2016). No entanto, devido à configuração da usina, a queda bruta é de aproximadamente 131 m (BRASIL, 2016).

A UHE Governador Parigot de Souza, com potência instalada de 260 MW (SEARA, 2010), apresenta uma configuração semelhante. Seu reservatório possui áreas alagadas de aproximadamente 12,8 km² e 2,5 km² ao nível d'água máximo e mínimo de operação, respectivamente (EPE, 2016b). Sua barragem possui altura máxima de 60 m, entretanto sua queda bruta em relação ao nível médio do canal de fuga é de 746,80 m (SEARA, 2010). Tal disparidade se dá devido a sua configuração, que envolve um conduto forçado de 14,5 km de extensão que atravessa a Serra do Mar paranaense e desemboca no rio Cachoeira, localizado na planície litorânea (SEARA, 2010). Conforme observado na seção 2.2, o desvio de recursos hídricos a outra bacia hidrográfica pode teoricamente ser considerado uma pegada hídrica. Neste caso, toda a vazão turbinada – e não somente o volume evaporado – deveria ser considerado para estimativas de pegadas hídricas dos aproveitamentos nos quais isso ocorre. No presente estudo optou-se por não realizar tal consideração de modo a manter um procedimento coerente de geração de estimativas de pegada hídrica entre todos os aproveitamentos.

³ Existe a possibilidade de que tal tendência não se verifique nos casos em que a vazão seja relativamente baixa.

Figura 14 – Concepção artística do aproveitamento hidrelétrico Salto Pilão.



Fonte: adaptado de Consórcio Empresarial Salto Pilão (20---a)

3.3 ESTIMATIVAS DE PEGADAS HÍDRICAS

De acordo com a classificação em termos de escala de análise proposta na seção 2.2, o objetivo do presente trabalho pode ser enquadrado na determinação da pegada hídrica de um produto (a energia hidrelétrica) dentro de uma área delimitada geograficamente – a região Sul do Brasil e divisas. Para a primeira categoria na qual se enquadra (a de um produto), a metodologia recomendada pelo Manual de Avaliação da Pegada Hídrica⁴ (HOEKSTRA *et al.*, 2011) envolve a consideração de todas as pegadas hídricas parciais das etapas envolvidas em sua geração. No caso da hidroeletricidade, estas envolveriam as atividades de escritório (projeto e operação dos sistemas), conforme observado por Ferreira (2014), além das atividades e materiais envolvidos na construção dos aproveitamentos. Entretanto, a magnitude das pegadas hídricas associadas a tais fatores é, por via de regra, considerada desprezível frente à evaporação na superfície dos reservatórios criados para fins de geração de energia. Sendo assim, tais elementos tem sido ignorados em estudos referentes ao tema (HERATH *et al.*, 2011; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2012; WILSON *et al.*, 2012; BUENO, 2014).

De modo a se manter a coerência com a metodologia proposta por Mekonnen e Hoekstra (2012), adotou-se a fórmula (1), apresentada na seção 2.3, para o cálculo da pegada hídrica. Para a estimativa do termo correspondente ao volume de perdas de água por evaporação (AET), procedeu-se à multiplicação das evaporações em corpo d'água geradas no programa WREVAP (em milímetros por mês) pelas respectivas áreas superficiais dos reservatórios em análise, conforme indicado na equação (4).

$$AET = AET_{mm} \cdot A_{res} \cdot 10^3 \quad (4)$$

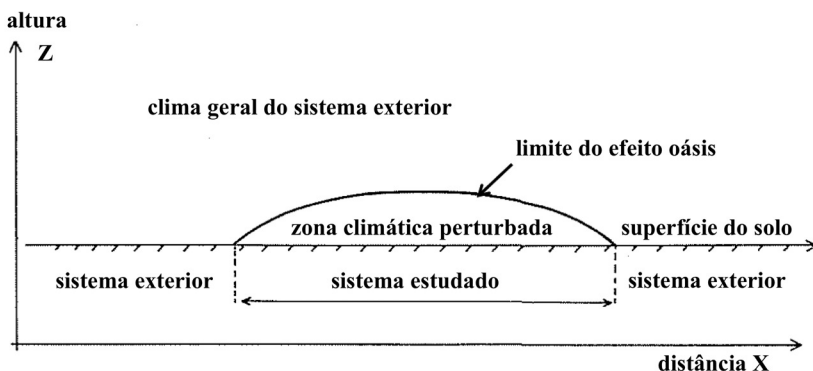
onde AET corresponde ao volume de água evaporado em um dados mês após a construção do reservatório (m³); A_{res} corresponde à área superficial do reservatório (km²); e AET_{mm} corresponde à evaporação em um dado mês após a construção do reservatório em milímetros, estimada a partir do programa WREVAP.

⁴ *Water Footprint Assessment Manual* na publicação original, em inglês.

3.3.1. Aplicação do modelo WREVAP

Bouchet (1963) introduziu o conceito de relação complementar ao apresentar a consideração de que, em áreas relativamente extensas e homogêneas e nas quais há reduzido transporte de calor e umidade por advecção, existe uma relação de retroalimentação entre a umidade do solo e a da atmosfera que se reflete na regulação recíproca entre a evapotranspiração real e evapotranspiração potencial. Tal fenômeno foi chamado pelo autor de “efeito oásis” e é ilustrado na figura 15.

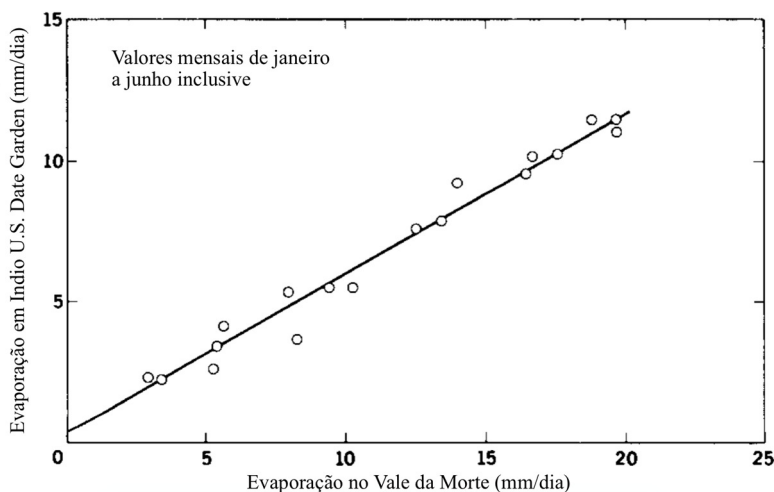
Figura 15 – Ilustração do efeito oásis.



Fonte: adaptado de Bouchet (1963)

Diversos estudos relacionados ao tema foram elaborados nas duas décadas que se seguiram, conforme resumido no apêndice A de Morton (1983a). Em tal trabalho são apresentadas uma racionalização conceitual e evidências empíricas para a relação complementar. Demonstra-se a ocorrência do efeito oásis ao se compararem as evaporações de tanque classe A medidas em uma localidade desértica (Vale da Morte) com uma área irrigada (“*Indio U.S. Date Garden*”), conforme ilustrado na figura 16. Verificou-se que, para os meses do primeiro semestre, as evaporações medidas na região irrigada correspondem, em média, a 57% dos valores observados na região desértica. Atribuiu-se tal diferença ao aumento da umidade relativa do ar no interior e nas proximidades da área irrigada, diminuindo assim a evaporação ocorrida.

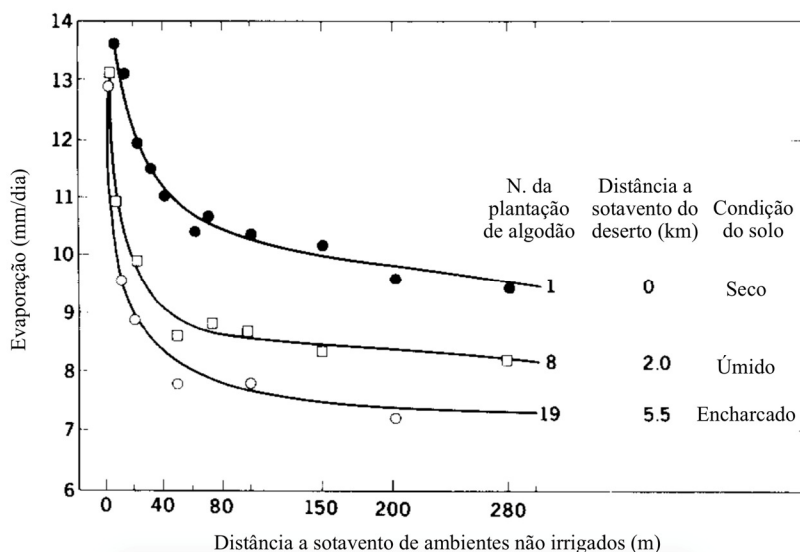
Figura 16 – Relação entre evaporações de tanque classe A medidas em duas localidades da Califórnia, EUA.



Fonte: adaptado de Morton (1983a)

Outra demonstração do efeito da umidade do solo sobre as taxas de evaporação locais e nas proximidades é realizada no estudo de Davenport e Hudson apud MORTON (1983a). Neste, mediram-se e se compararam as evaporações em campos irrigados de algodão e em suas proximidades. Observou-se que a passagem do ar seco sobre os campos irrigados resultava em uma drástica redução da evaporação no sentido longitudinal, até que esta atingisse um valor constante em cerca de 300 m – tal fenômeno consiste no “efeito de borda” e é ilustrado na figura 17. À medida que o ar deixava as plantações a evaporação aumentava rapidamente até estabilizar-se em um novo valor após cerca de 300 m (Davenport e Hudson apud MORTON, 1983a). Verificou-se que as evaporações medidas a sotavento das plantações corresponderam, respectivamente, a 69%, 60% e 53% dos valores a barlavento, para condições de solo “seco”, “úmido” e “encharcado”, respectivamente (Davenport e Hudson apud MORTON, 1983a). Tais condições podem ser consideradas análogas ao que ocorre em corpos d’água localizados em ambientes variando entre secos e úmidos (MORTON, 1983b).

Figura 17 – Comparação de taxas de evaporação em tanques ao longo de campos de algodão irrigado em 27 de dezembro de 1967.



Fonte: adaptado de Davenport e Hudson *apud* Morton (1983a)

Após uma revisão crítica das técnicas existentes para estimativa de evaporação, Morton (1983a) concluiu que estas se baseiam em suposições descasadas da realidade, conforme será especificado adiante. Adicionalmente, o autor observou que medições diretas de evaporação possuem uma demanda intensiva de força de trabalho qualificada e são baseadas em suposições não-verificadas. Neste contexto, defendeu-se a consideração das respostas complementares entre a evaporação potencial e a disponibilidade de água para evaporação real como técnica para aproximação das estimativas à realidade (MORTON, 1983a).

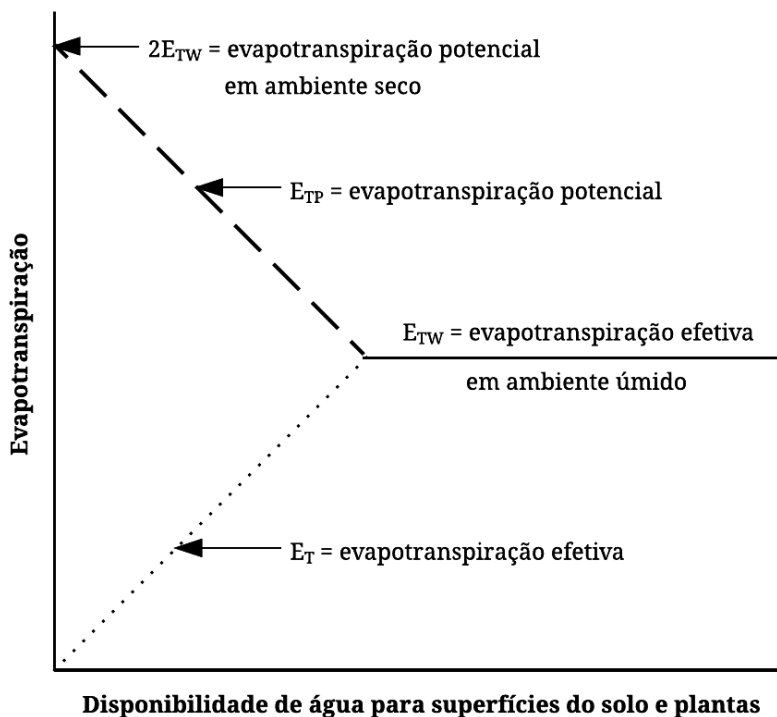
O modelo *Complementary Relationship Aerial Evapotranspiration* (CRAE) foi concebido para estimativa de evaporação real em superfícies terrestres com base na suposição descrita acima – uma quantidade decrescente de umidade no solo resulta em uma redução na taxa de evapotranspiração real e, simultaneamente, em um aumento da evapotranspiração potencial (ONS, 2004). No sentido oposto, a evapotranspiração real se iguala à evapotranspiração potencial quando o solo estiver saturado. Tal comportamento é ilustrado na figura 18, e descrito pela equação 5:

$$E_T + E_{TP} = 2E_{TW} \quad (5)$$

onde E_T corresponde à evapotranspiração em uma área tão grande que os efeitos de borda sejam negligenciáveis; E_{TP} é a evapotranspiração potencial, estimada a partir das equações de transferência de vapor d'água e de balanço de energia, definida por Morton (1983a) como “a evapotranspiração que ocorreria de uma superfície úmida hipotética com características de absorção de radiação e transferência de vapor similares às da área considerada e tão pequena que os efeitos da evapotranspiração sobre o ar acima seriam negligenciáveis”; e E_{TW} é evapotranspiração em um ambiente hipoteticamente saturado sem limitação na disponibilidade de água.

Morton (1983a) menciona que a definição convencional de evaporação potencial é igual à definição da evaporação em um ambiente hipoteticamente saturado (E_{TW}). Entretanto, o autor destaca que a evaporação potencial resultante de estimativas analíticas (PENMAN, 1948), gráficas ou iterativas responde a variações na disponibilidade de água de modo similar ao ilustrado para E_{TP} na figura 16. Sendo assim, os valores estimados excederiam o que a definição se propõe a calcular em até 100% (MORTON, 1983a) dependendo da umidade disponível ao solo e às plantas. Morton (1983a) argumenta que, ao passo que a grande maioria dos conceitos utilizados em hidrologia são baseados em aproximações questionáveis (incluindo o próprio hidrograma unitário), a relação complementar entre a evapotranspiração real e potencial possui um embasamento físico realístico. Adicionalmente, salienta-se sua capacidade de fornecer estimativas independentes e confiáveis de evaporação real para uma grande amplitude de ambientes.

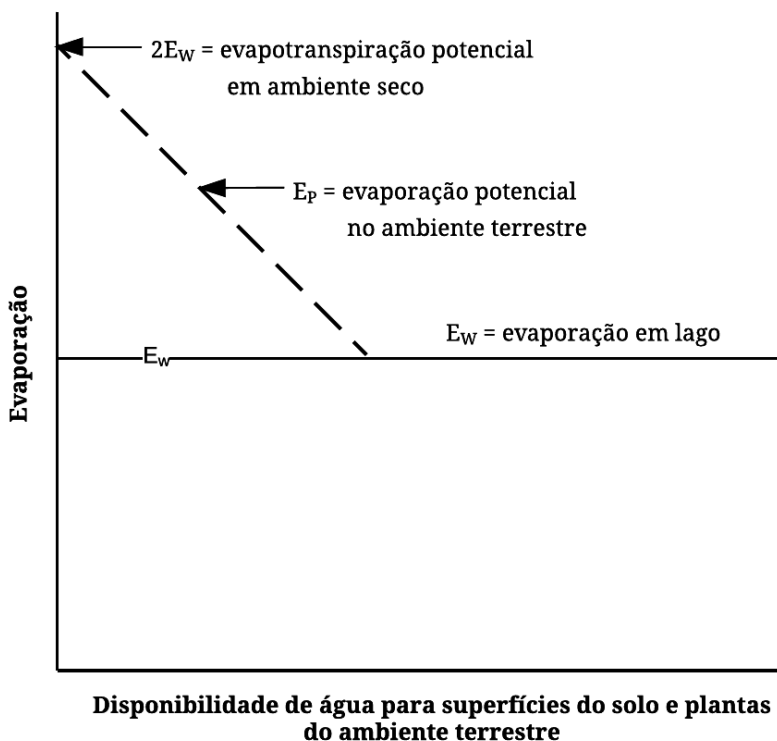
Figura 18 – Ilustração do conceito de relação complementar aplicado a superfícies terrestres para valor constante de energia radiante.



Fonte: adaptado de Morton (1983a)

O algoritmo *Complementary Relationship Lake Evaporation* (CRLE), por sua vez, consiste em uma adaptação ao modelo CRAE, baseada no mesmo princípio porém considerando que a evaporação real e a evaporação potencial de um lago são respectivamente distintas da evaporação real e evaporação potencial em ambientes saturados meramente devido a diferenças nas características de absorção de calor e transferência de vapor entre os dois tipos de superfície (MORTON, 1983b). Destaca-se que, apesar de a evaporação real em um lago ser igual à evaporação potencial neste ambiente, ela pode ser consideravelmente distinta da evaporação potencial dos ambientes terrestres (MORTON, 1983b) onde costuma ser medida, conforme ilustrado na figura 19.

Figura 19 – Ilustração do conceito de relação complementar aplicado a superfícies de corpos d'água para valor constante de energia radiante.



Fonte: adaptado de Morton (1983b)

De modo a descrever o armazenamento de calor, adicionaram-se ao modelo as variáveis profundidade média e salinidade (MORTON, 1983b). Segundo McMahon *et al.* (2013a), este processo é particularmente relevante em lagos naturais ou artificiais devido à possibilidade de ocorrência de estratificação decorrente de gradientes de temperatura ou salinidade.

A teoria da relação complementar possui aplicabilidade em corpos d'água formados a partir do barramento de rios para fins de aproveitamento de energia. Observações de tanque são influenciadas significativamente pela disponibilidade de água para evapotranspiração no entorno e, portanto, não representam o ambiente sobre um lago (MORTON,

1983b). Tal disparidade tem sido levada em conta tradicionalmente através da adoção de coeficientes de tanque, com os quais a relação complementar é compatível (MORTON, 1986).

Em reservatórios com consideráveis áreas superficiais, pode-se desprezar a influência das disponibilidade de água no ambiente terrestre no entorno do corpo d'água (MORTON, 1983b), caracterizada pelos efeitos de borda descritos previamente e ilustrados na figura 17. Em tal hipótese, a evaporação no ambiente aquático independe da disponibilidade de água no solo e plantas do ambiente terrestre (MORTON, 1983a). Sendo assim, as condições para a ocorrência da evaporação estão sobretudo atreladas à própria taxa evaporação do reservatório, de modo análogo ao ilustrado na figura 15 – tal suposição é feita no CRLE. O algoritmo CRLE também leva em consideração o armazenamento de energia térmica nos corpos d'água e sua distribuição ao longo de seu perfil, que pode causar uma diferença de fase com a evaporação esperada em corpos d'água rasos para dadas condições atmosféricas. O modelo também considera o *input* líquido de calor da água, que entretanto só é relevante para reservatórios profundos em zonas de clima quente (MORTON, 1983b).

Ao realizar interpolações de valores estimados para evaporação em lagos da América do Norte, Morton (1983b) verificou que as estimativas realizadas com base no CRLE tendem a ser significativamente superiores às previamente publicadas em áreas com elevada umidade relativa e inferiores em regiões mais secas. Tal discrepância foi atribuída precisamente ao fato de que o modelo considerou diferenças entre o ambiente de lagos e o terrestre, ao passo que as informações anteriores se baseavam apenas no último.

Para a estimativa da evaporação em corpos d'água profundos (CRLE), são utilizados os dados de entrada elencados no quadro 1.

Quadro 1 – Dados de entrada para o programa WREVAP.

Características do reservatório		Séries históricas	
Variável	Unidade	Variável	Unidade
Latitude	Graus UTM decimais	Temperatura média diária	°C
Elevação	m	Umidade	%
Precipitação média anual	mm	Insolação	horas.dia ⁻¹
Profundidade média	m		
Salinidade	ppm		

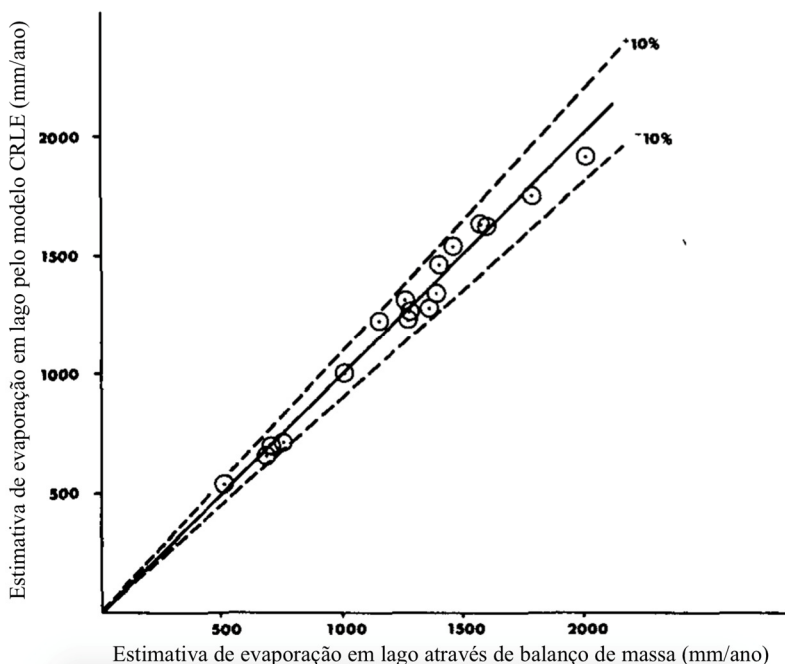
Nota: Para estimativas de evaporação em ambientes terrestres (CRAE) e em corpos d'água rasos (CRWE) não são necessários dados de profundidade média ou salinidade.

A partir dos dados acima, o algoritmo gera séries de mensais de (MORTON, 1983b):

- Balanço líquido de energia radiante baseado na hipótese de superfície da água à mesma temperatura do ar acima (em unidades de evaporação equivalente);
- Evaporação potencial;
- Evaporação real.

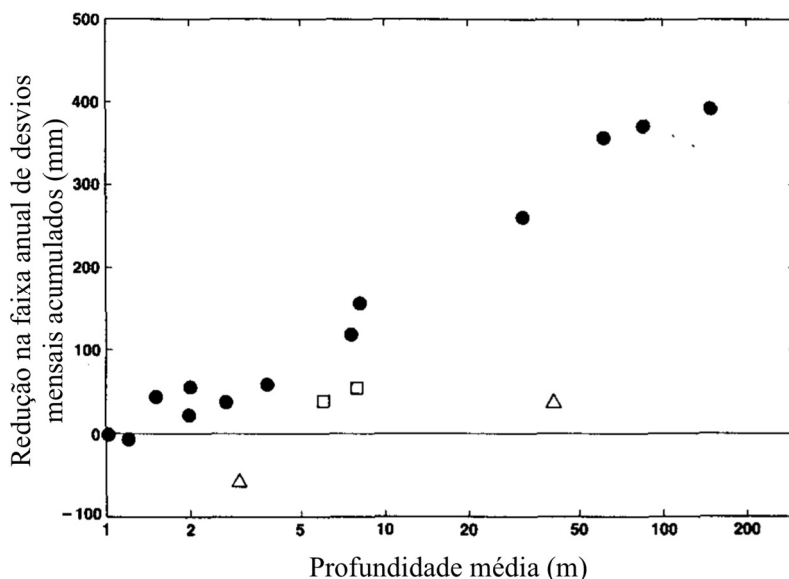
A figura 20 ilustra o bom ajuste entre as estimativas de evaporação anual obtidas por Morton (1986) através do modelo CRLE e estimativas anteriores baseadas no balanço de massa para os mesmos corpos d'água. O autor observou que o emprego do *routing* possui um efeito de redução dos desvios entre os valores mensais estimados pelo WREVAP e os obtidos por balanço de massa, sendo sua influência proporcional à profundidade do corpo d'água, conforme ilustrado na figura 21. Os pontos representados por triângulos correspondem a lagos localizados em latitudes relativamente baixas (Lago *Okeechobee* na Flórida, EUA, e Lago Vitória, na África Oriental), acerca dos quais Morton (1986) inferiu que provavelmente existiriam erros nos balanços hídricos mensais. Os pontos representados por quadrados correspondem a lagos de elevada salinidade (Lago Salton e Grande Lago Salgado, ambos nos EUA), para os quais Morton (1986) admitiu haver limitações no modelo CRLE.

Figura 20 – Comparação entre estimativas de evaporação anual em lagos a partir do balanço de massas e do modelo CRLE.



Fonte: adaptado de Morton (1986)

Figura 21 – Efeito do *routing* na redução da faixa anual de desvios mensais em estimativas de evaporação.



Fonte: adaptado de Morton (1986)

Deve-se ressaltar que o parâmetro em relação ao qual o CRLE apresenta maior sensibilidade é a insolação (ou radiação solar incidente quando disponível), sendo o modelo “relativamente insensível” a erros nos valores de umidade e temperatura do ar (MORTON, 1983b). Em termos quantitativos, o modelo possui respostas desprezíveis a variações de latitude inferiores a 1° , variações de altitude inferiores a 200 m, variações de salinidade inferiores a 5000 ppm e variações de profundidade média inferiores a 5% nos dados de entrada Morton (1986). O autor também resalta que a localidade precisa onde são feitas as medições dos parâmetros de entrada não é de grande relevância, dado que a relação complementar leva em consideração os efeitos de ambientes distintos – observa-se uma distância de até aproximadamente 70 km entre alguns lagos e os respectivos locais de coleta de séries históricas de dados meteorológicos para estimativas de evaporação em Morton (1983b). Tal insensibilidade foi verificada também em um reservatório brasileiro por dos Reis e Dias (1998).

Morton (1983b) também argumentou que o emprego da variável velocidade do vento para estimativas de evaporação em lagos não reduz os erros de modo significativo, podendo inclusive aumentá-los. O autor forneceu argumentos específicos para tal consideração:

- A turbulência induzida pelo calor possui preponderância sobre a turbulência induzida pelo vento, sendo sua preponderância mais acentuada quando este possui baixas velocidades;
- O aumento da evaporação devido ao aumento da velocidade do vento é parcialmente compensado pela diminuição da temperatura na superfície da água;
- As medições em terra do parâmetro vento são, de modo geral, afetadas significativamente pelos elementos do entorno e pela rugosidade da superfície, e não necessariamente indicam a velocidade do ar sobre a superfície de corpos d'água próximos.

A premissa básica da existência de uma relação complementar entre a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real, expressa na equação (5), pode ser reescrita como:

$$E_T = 2E_{TW} - E_{TP} \quad (6)$$

Deste modo, a estimativa da evapotranspiração real (E_T) evolve a determinação prévia da evaporação potencial pontual⁵ (E_{TW}) e da evaporação potencial de um ambiente saturado sem limitação na disponibilidade de água (E_{TP}). Especificamente para a evaporação (e não evapotranspiração), adotam-se os termos E_W e E_P em substituição aos termos E_{TW} e E_{TP} , respectivamente. Conforme abordado adiante e ilustrado previamente na figura 19, em corpos d'água a evaporação real (AET) corresponde ao valor de E_W com aplicação de restrições, devido à consideração de disponibilidade irrestrita de água para evaporação.

A equação (7) apresenta o equilíbrio de energia:

$$\begin{aligned} E_p &= R_T - [\gamma \cdot p \cdot f_T + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p + 273)^3] \cdot (T_p - T) \\ &= R_T - \lambda_p \cdot f_t \cdot (T_p - T) \end{aligned} \quad (7)$$

⁵ Trata-se de grandeza geralmente estimada por tanques classe A localizados em ambientes terrestres e que consequentemente não considera o efeito oásis.

onde E_p corresponde à evaporação potencial em unidades de calor latente; R_T é a radiação líquida para superfícies aquáticas à temperatura do ar; γ é a constante psicrométrica; p é a pressão atmosférica⁶; f_T é o coeficiente de transferência de vapor; ε é a emissividade da superfície (considerada 0,97 para lagos); σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-2}$); T é a temperatura do ar (em °C) e T_p é a temperatura de equilíbrio (em °C), definida como a temperatura da água para a qual a soma de todos os fluxos de energia é zero (BUENDIA *et al.*, 2015). O fator λ_p é dado pela equação (8):

$$\lambda_p = \gamma \cdot p + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{(T_p + 273)^3}{f_T} \quad (8)$$

A equação (9) apresenta a transferência de vapor:

$$E_p = f_T \cdot (v_p - v_D) \quad (9)$$

sendo v_p é a pressão de saturação do vapor (mbar) à temperatura de equilíbrio (T_p) e v_D a pressão de saturação do vapor (mbar) à temperatura do ponto de orvalho.

A solução das equações (7) e (9) proposta por Morton (1983a) envolve um processo iterativo, apresentado nas equações (10), (11), (12) e (13). Este é repetido até que $[\delta T_p] \geq 0,01^\circ\text{C}$, o que ocorre em até quatro iterações (MORTON, 1983a). O valor obtido para T_p é então substituído na equação (7) para a obtenção de E_{Tp} .

$$[\delta T_p] = \frac{\frac{R_T}{f_t} + v_D - v'_p + \lambda_p \cdot (T - T'_p)}{\Delta'_p + \lambda_p} \quad (10)$$

$$T_p = T'_p + [\delta T_p] \quad (11)$$

$$v_p = 6,11 \cdot \exp \left[\frac{\alpha \cdot T_p}{T_p + \beta} \right] \quad (12)$$

⁶ Conforme mencionado por McMahon *et al.* (2013a) as unidades adotadas para algumas variáveis de cálculo foram omitidas em Morton (1983a)

$$\Delta_p = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot v_p}{(T_p + \beta)^2} \quad (13)$$

onde v_p' é a pressão de saturação de vapor em T_p' (mbar) e Δ_p' é o gradiente da curva de pressão de saturação de vapor em T_p' .

No segundo termo da equação (6), E_w corresponde à evaporação em ambiente úmido (saturado). Para a quantificação desta, Morton (1983a) optou por realizar uma adaptação à equação de Priestley e Taylor (1972), conforme apresentado na equação (14):

$$E_w = b_1 + b_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma \cdot p}{\Delta_p}\right)^{-1} \cdot R_{TP} \quad (14)$$

onde b_1 e b_2 são constantes cujos valores (13 W.m^{-2} e $1,12$ respectivamente) foram calibrados a partir de estimativas de balanço hídrico em corpos d'água localizados na América do Norte e na África; Δ_p é o gradiente da curva de pressão de saturação de vapor (em $^{\circ}\text{C}^{-1}$) em T_p e R_{TP} é a radiação líquida na superfície do corpo d'água à temperatura T_p .

O coeficiente de transferência de vapor (f_T), calibrado em conjunto com as variáveis b_1 e b_2 , é dado por:

$$f_T = \left(\frac{p_s}{p}\right)^{0,5} \cdot \frac{f_z}{\zeta} \quad (15)$$

onde f_z é uma constante cujo valor estimado por Morton (1983a) para corpos d'água é 25 W.m^{-2} , e p e p_s são, respectivamente, a pressão atmosférica local e a pressão atmosférica ao nível do mar. ζ é um fator adimensional de estabilidade dado por:

$$\frac{1}{\zeta} = 0,28 \cdot \left(1 + \frac{v_D}{v}\right) + \frac{\Delta R_{TC}}{\gamma \cdot p \cdot \left(\frac{p_s}{p}\right)^{0,5} \cdot b_0 \cdot f_z \cdot (v - v_D)} \quad (16)$$

$$\text{com } \frac{1}{\zeta} \leq 1$$

onde b_0 possui o valor de $1,12$ para evaporação em lagos e R_{TC} é R_T com $R_{TC} \geq 0$. Segundo Morton (1983a), o segundo termo da soma da equação (16) consiste em uma aproximação preliminar da razão entre o termo correspondente à radiação e o termo correspondente à transferência de vapor da equação de Penman (1948), a qual é assumida como um

indicador razoável dos efeitos da estabilidade atmosférica no coeficiente de transferência de vapor.

Destaca-se que a evaporação em lago possui um valor independente da disponibilidade de água às superfícies terrestres adjacentes, conforme ilustrado na figura 19. Sendo assim, neste caso não se procede à aplicação da equação (6), dado que a evaporação em corpos d'água é equivalente a E_w , previamente estimado pela equação (14), aplicando-se a restrição:

$$\frac{1}{2}E_p \leq E_w \leq E_p \quad (17)$$

Para corpos d'água profundos, é necessário que sejam considerados os efeitos do armazenamento intermensal de calor na temperatura da água e, conseqüentemente, na evaporação. Um algoritmo com tal propósito foi apresentado por Morton (1983b) e modificado por Morton (1986) de modo a abranger uma maior faixa de profundidades. O procedimento de cálculo envolve a consideração de um reservatório de calor abstrato. Neste, a entrada de calor em um dado mês (G_w^0) é dada por:

$$G_w^0 = (1 - a) \cdot G + h \quad (18)$$

onde G é a radiação incidente global; a é o albedo (0,05 para corpos d'água com céu limpo); e conseqüentemente o termo $(1-a) \times G$ corresponde à entrada de energia solar. Os aportes de energia através das vazões afluentes ao reservatório (com uma temperatura superior ao inferior à da água no reservatório), representados por h , são desprezíveis na maior parte dos casos (MORTON, 1986) e não foram considerados no presente estudo.

O tempo de resposta da água doce devido à inércia térmica (t_0) em meses é dado por:

$$t_0 = 0,96 + 0,013 \cdot d \quad (19)$$

com $0,039d \leq t_0 \leq 0,13d$

onde d é a profundidade média do lago (em metros). O tempo de resposta do lago (t) em meses é dado por:

$$t = \frac{t_0}{\left(1 + \frac{s}{27000}\right)^2} \quad \text{com } t \leq 6,0 \quad (20)$$

onde s é a salinidade do lago (em ppm). A constante de armazenamento (k) em meses é dada por:

$$k = \frac{t_0}{1 + \left(\frac{d}{93}\right)^7} \quad (21)$$

As equações (19), (20) e (21) foram derivadas iterativamente por Morton (1986) de modo a ajustar o modelo CRLE a valores de evaporação mensal de nove lagos ao longo de um ano obtidos através de balanços hídricos.

As entradas retardadas de energia (G_w^t) são dadas por:

$$G_W^t = G_W^{[t]} + (t - [t]) \cdot (G_W^{[t+1]} - G_W^{[t]}) \quad (22)$$

onde $[t]$ e $t - [t]$ são, respectivamente, os componentes inteiro e fracionário de t ; $G_W^{[t]}$ é o valor de G_W^0 computado $[t]$ meses antes; e $G_W^{[t+1]}$ é o valor de G_W^0 computado para $[t+1]$ meses antes. Sendo assim, o modelo leva em consideração as entradas de energia de dois dos meses precedentes ao período em consideração.

A energia total disponível (G_L) é dada pelo procedimento de *routing* linear expresso nas equações (23) e (24):

$$G_{LE} = G_{LB} + \frac{G_W^t - G_{LB}}{0,5 + k} \quad (23)$$

$$G_L = \frac{G_{LE} + G_{LB}}{2} \quad (24)$$

onde G_{LB} e G_{LE} são as energias disponíveis, respectivamente, no início e ao fim do mês atual. G_{LE} é posteriormente convertido em G_{LB} do mês seguinte. Possíveis erros ocasionados pela seleção arbitrária de condições iniciais para o processo de *routing* foram mitigados pela utilização de séries temporais de entrada com início alguns meses ou anos antes do período de interesse (período abrangido pelos dados de geração de energia), conforme detalhado na próxima seção.

Maiores detalhes acerca dos procedimentos de cálculo envolvidos no algoritmo WREVAP empregado no presente estudo são apresentados no apêndice C de Morton (1983a) e no apêndice C de McMahon *et al.* (2013a).

3.3.2. Fontes de dados

O quadro 2 apresenta um resumo das fontes de dados primários adotadas para as estimativas de pegadas hídricas, e o apêndice C ilustra o procedimento utilizado para a geração destas. Pode-se conjecturar que os aproveitamentos hidrelétricos sejam responsáveis apenas pela evaporação incremental decorrente das áreas inundadas além das calhas naturais dos rios. Estas podem corresponder a uma proporção significativa do total, chegando por exemplo a mais de 50% no caso de aproveitamentos como a UHE Foz do Chapecó. Entretanto, constataram-se lacunas na disponibilidade de dado para livre acesso – a calha natural do rio de modo geral não é diferenciada da área inundada total de cada reservatório. Sendo assim, de modo a manter a coerência das pegadas hídricas estimadas para todos os aproveitamentos entre si e com a bibliografia consultada, adotaram-se as áreas superficiais **totais** correspondentes ao nível máximo de operação de cada reservatório.

Quadro 2 – Fontes de dados para as estimativas de pegadas hídricas.

Dado	Unidade	Fonte
Altitude	m	BRASIL (2016)
Salinidade	ppm	(adotada – ver item 4.1.2)
Precipitação média anual	mm	(adotada – ver item 4.1.3)
Profundidade do reservatório	m	(diversas, ver discussão)
Temperatura média do ar	°C	IAPAR (2016) e INMET
Umidade relativa média do ar	%	(2016) de acordo com estação
Insolação diária média	horas	adotada; ver apêndice B
Área superficial	km ²	EPE (2016b) ¹
Histórico de geração de energia	GJ.mês ⁻¹	ANEEL (2016b) ²

1 – Excetuando-se os aproveitamentos Bugres (CEEE, 2011a; b), Canastra (CEEE, 2011c), Chaminé-Vossoroca e Guaricana (ANEEL, 20--) e Palmeiras (CELESC, 2016)

2 – Excetuando-se a UHE Itaipu (ITAIPU, 2016)

As áreas superficiais dos aproveitamentos Bugres, Canastra, Chaminé-Vossoroca, Guaricana e Palmeiras não se encontravam disponíveis no banco de dados fornecido pela EPE (2016b). Sendo assim, tais valores foram obtidos a partir de arquivos da ANEEL (ANEEL, 20--),

projetos (CEEE, 2011a; b; d), e mediante solicitação (CELESC, 2016). Em caso de discordância entre as fontes, adotaram-se os valores mais elevados. Excepcionalmente para a UHE Bugres e para a PCH Palmeiras simularam-se separadamente e posteriormente se somaram as evaporações volumétricas dos reservatórios associados a empreendimento, conforme elucidado na seção 3.2.1.

Conforme previamente mencionado, o escopo do presente trabalho se restringiu a aproveitamentos cujas séries históricas de geração de energia estivessem em domínio público (ANEEL, 2016b). Entretanto, devido à relevância da UHE Itaipu em termos de área alagada e geração de energia, os dados de energia produzida desta, não disponíveis no referido portal, foram disponibilizados mediante solicitação (ITAIPU, 2016).

No presente estudo também se verificaram lacunas e incoerências nos dados de profundidade média para diversas das usinas analisadas. Nestes casos adotaram-se aproximações para tais valores em algumas ocasiões através da divisão do volume armazenado pela área superficial do reservatório (EPE, 2016b), ambos ao nível máximo operacional.

Conforme abordado na seção 2.4, o modelo WREVAP possui sensibilidade relativamente baixa ao parâmetro salinidade, sendo que Morton (1986) apresenta a consideração explícita de que, em casos de lagos de água doce, o valor para este parâmetro pode ser adotado.

O quadro 3 apresenta as respectivas abrangências temporais das séries de dados de geração e dos dados climáticos das respectivas estações meteorológicas associadas a cada aproveitamento. Observa-se que as séries históricas de parâmetros meteorológicos possuem uma abrangência temporal semelhante entre si. Entretanto, os dados de geração apresentam um cenário distinto devido ao fato de que diversos aproveitamentos entraram em operação ao longo dos últimos vinte anos. Deste modo, destaca-se que as pegadas hídricas estimadas para diferentes reservatórios não possuem como base o mesmo período de tempo. As informações acerca das estações meteorológicas utilizadas para cada UHE ou PCH são fornecidas no Apêndice B.

Lacunas e erros nas séries de dados climáticos foram preenchidas pelos respectivos valores médios mensais de cada variável obtidos dos dados remanescentes. *Outliers* nas séries históricas de geração de energia foram removidos, e as pegadas hídricas para os respectivos meses não foram computadas, conforme será discutido na seção 4.3.3.

Quadro 3 – Disponibilidade temporal de séries históricas de dados climáticos da estação meteorológica mais próxima e de geração de energia por aproveitamento hidrelétrico.

Aproveitamento	Dados clim. (início)	Dados clim. (fim)	N	Geração (início)	Geração (fim)	N
14 de Julho	1/1994	1/2016	268	12/2008	1/2016	86
Barra Grande	1/1994	1/2016	268	11/2005	1/2016	124
Bugres	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Campos Novos	1/1994	1/2016	268	2/2007	1/2016	109
Canastra	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Canoas I	1/1994	2/2016	269	6/1999	2/2016	203
Canoas II	1/1994	2/2016	269	6/1999	2/2016	203
Capivara	1/1993	5/2012	235	4/1993	1/2016	277
Castro Alves	1/1994	1/2016	268	3/2008	1/2016	95
Chaminé	1/1993	1/2015	268	4/1993	1/2016	277
Chavantes	1/1994	1/2016	280	4/1993	1/2016	277
Dona Francisca	1/1993	2/2016	281	1/2001	2/2016	184
Foz do Chapecó	1/1994	1/2016	268	10/2010	1/2016	64
Fundão	1/1993	1/2016	280	6/2006	1/2016	117
Garibaldi	1/1994	1/2016	268	9/2013	1/2016	28
Gov Rocha Neto	1/1993	1/2016	280	4/1993	1/2016	277
Gov Richa	1/1993	12/2015	279	5/1999	1/2016	203
Gov Braga	1/1993	1/2016	280	1/1993	1/2016	280
Gov Parigot de Souza	1/1993	1/2016	280	4/1993	1/2016	277
Guaricana	1/1993	1/2016	280	4/1993	1/2016	277
Itá	1/1994	1/2016	268	6/2000	1/2016	190
Itaipu	1/1984	1/2016	390	5/1984	1/2016	386
Itaúba	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Jacuí	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Machadinho	1/1994	1/2016	268	2/2002	1/2016	169
Mauá	1/1994	12/2014	255	11/2012	2/2016	40
Monte Claro	1/1994	1/2016	268	12/2004	1/2016	135
Ourinhos	1/1993	1/2014	256	12/2005	1/2016	123
Palmeiras	1/1994	1/2016	268	1/1994	1/2016	268
Passo Fundo	1/1994	1/2016	268	1/1994	1/2016	268
Passo Real	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Passo São João	1/1994	1/2016	268	8/2012	1/2016	42
Quebra Queixo	1/1994	1/2016	268	1/2004	1/2016	146
Rosana	11/1993	1/2016	270	4/1993	1/2016	277
Salto Grande	1/1993	2/2016	281	4/1993	2/2016	278
Salto Osório	1/1993	1/2016	280	4/1993	1/2016	277

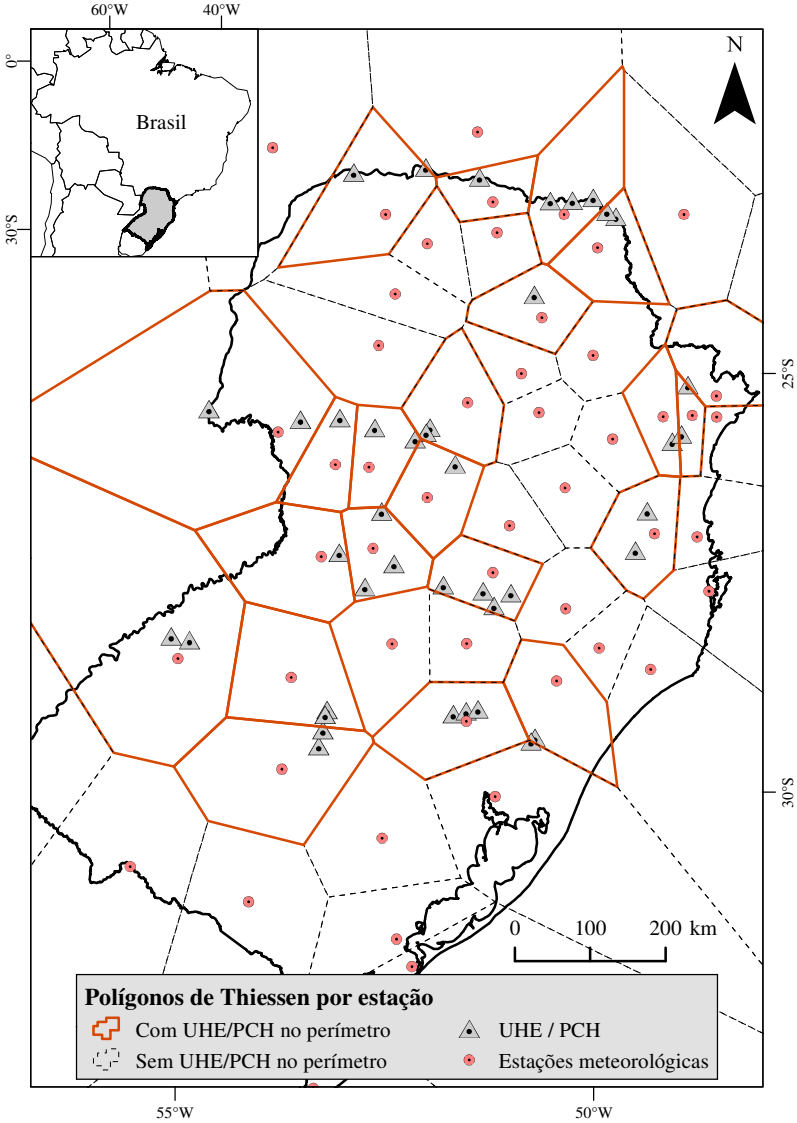
Aproveitamento	Dados clim. (início)	Dados clim. (fim)	N	Geração (início)	Geração (fim)	N
Salto Pilão	1/1994	1/2016	268	1/2010	1/2016	73
Salto Santiago	1/1993	1/2016	280	4/1993	1/2016	277
Santa Clara	1/1993	1/2016	280	7/2005	1/2016	128
São José	1/1994	2/2016	269	4/2011	2/2016	59
Taquaruçu	1/1993	2/2016	281	5/1993	2/2016	277

N – número de meses abrangidos pelos dados disponíveis (incluindo *outliers* e falhas)

3.3.3. Alocação de estações meteorológicas a aproveitamentos hidrelétricos

Conforme previamente elucidado, o programa WREVAP em seu módulo CRLE (para corpos d'água profundos) não demanda aferições locais dos parâmetros de entrada (MORTON, 1986). A seção 4.1 ilustrará também a reduzida sensibilidade do modelo a variações em dados como altitude e precipitação média anual. Sendo assim, as evaporações nos reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos foram estimadas a partir de séries históricas das respectivas estações meteorológicas geograficamente mais próximas. Tal análise foi executada de acordo com as informações de localização geográfica dos pontos de interesse, e é ilustrada na figura 22. As estações selecionadas e os respectivos aproveitamentos hidrelétricos associados a estas são apresentados no apêndice B.

Figura 22 – Ilustração do critério de alocação dos aproveitamentos hidrelétricos a estações meteorológicas.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SENSIBILIDADE DO PROGRAMA WREVAP AOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Os dados de entrada para o programa WREVAP são elencados no quadro 1. Possíveis distorções nas estimativas de evaporação em cada aproveitamento hidrelétrico são associáveis a, entre outros:

- Erros e lacunas nas séries históricas de umidade relativa do ar, temperatura e insolação;
- Diferenças nas condições meteorológicas nos locais das estações adotadas e nos respectivos aproveitamentos hidrelétricos;
- Incertezas quanto a características dos reservatórios (profundidade média, salinidade, precipitação média anual e altitude).

Devido a estes fatores, torna-se imperativa a realização de análises de sensibilidade do WREVAP a seus parâmetros de entrada. Tal procedimento permite a quantificação dos possíveis erros a serem propagados às estimativas de evaporação e, consequentemente, às pegadas hídricas. Para este propósito, adotou-se a UHE Garibaldi, localizada em Santa Catarina, com capacidade instalada de 192 MW e reservatório de aproximadamente 26,8 km². A estação meteorológica Campos Novos (código OMM 83887), localizada a aproximadamente 34 km de distância do aproveitamento hidrelétrico, foi adotada como fonte de séries históricas de parâmetros meteorológicos, abrangendo o período de janeiro de 1994 a janeiro de 2016 inclusive⁷. A partir da variação das características e séries históricas iniciais, geraram-se séries históricas paralelas de evaporação em milímetros (AET_{mm}), as quais foram comparadas com a série original. Os resultados obtidos para cada parâmetro analisado são ilustrados nos itens a seguir.

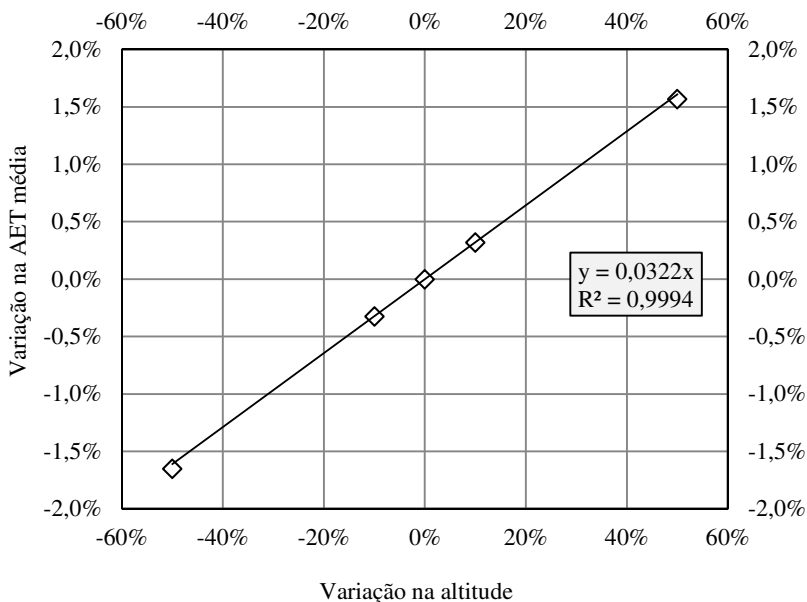
4.1.1. Altitude

A altitude do reservatório é tomada em conta para fins de cálculo da pressão de vapor a partir da umidade relativa do ar. Fixando-se os demais parâmetros, verifica-se uma relação linear entre a variação na altitude do lago e a AET média anual estimada, na qual uma variação de

⁷ Salienta-se que os dados de geração da UHE Garibaldi – e, consequentemente, as pegadas hídricas mensais estimadas – tem início em setembro de 2013, conforme explicitado no quadro 3.

1% na primeira corresponde a uma variação de aproximadamente 0,032% na segunda, conforme ilustrado na figura 23. Conclui-se, portanto, que se trata de um parâmetro ao qual o modelo CRLE é relativamente insensível.

Figura 23 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na altitude (nível d'água a montante) do reservatório.



4.1.2. Salinidade

A salinidade é utilizada pelo algoritmo CRLE para simulação da estratificação nos corpos d'água, com reflexos no armazenamento de calor. Conforme abordado na seção 2.4, a salinidade é um parâmetro cuja resposta do modelo é negligenciável para valores abaixo de 500 ppm, que é o caso de corpos d'água doce. Tal observação é ilustrada na tabela 2, onde se verifica que as variações na AET são desprezíveis para uma faixa de valores de salinidade acima da esperada para corpos d'água doce.

Tabela 2 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na salinidade do lago.

Salinidade (ppm)	Variação na Salinidade	AET média anual (mm)	Variação na AET (%)
0	-100%	1212,43	0,00E+00
0,25	0%	1212,43	0,00E+00
2,5	1000%	1212,43	0,00E+00
25	10000%	1212,44	8,25E-06
250	100000%	1212,60	1,40E-04
2500	1000000%	1214,05	1,34E-03
25000	10000000%	1217,43	4,12E-03

4.1.3. Precipitação média anual

O emprego da precipitação média anual sobre o reservatório no CRLE se restringe a adaptações no valor da radiação solar incidente, e possui relevância apenas em locais de latitude elevada (MORTON, 1986). Conforme ilustrado na tabela 3, a precipitação média anual, dentro uma faixa de valores esperados para a região Sul do Brasil, não possui influência sobre a AET.

Tabela 3 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na precipitação média anual adotada.

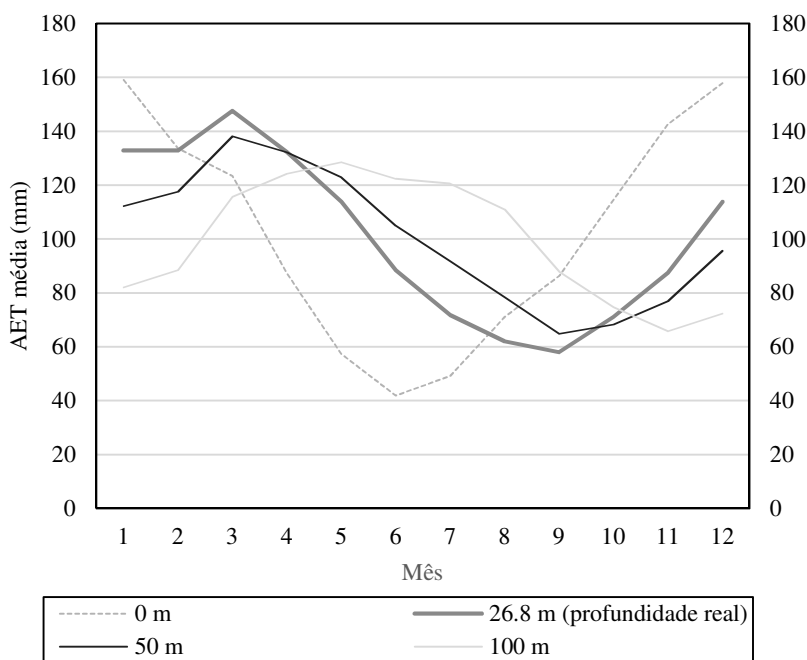
Precipitação (mm)	Variação na precipitação	AET média anual (mm)	Variação na AET (%)
0	-100%	1212,43	0.00E+00
500	-50%	1212,43	0.00E+00
1000	0%	1212,43	0.00E+00
1500	50%	1212,43	0.00E+00
2000	100%	1212,43	0.00E+00

4.1.4. Profundidade média do reservatório

A profundidade média dos reservatórios consiste no parâmetro mais crítico em termos de disponibilidade de dados. Tal como a salinidade, consiste em um dado de entrada para o *routing* linear realizado pelo CRLE para simular o armazenamento de calor nos corpos d'água ao longo das estações. Considerando-se que a variação interanual na quantidade de calor armazenado seja desprezível, a AET média anual para um corpo d'água possui reduzida dependência na profundidade deste. Entretanto, verificam-se variações significativas nos valores estimados de evaporação mensal, os quais podem ser associados à variação

na capacidade de armazenamento de calor dos lagos. Deve-se destacar que tal efeito torna-se evidente quando ocorre uma variação significativa na profundidade do lago, tal como ilustrado na figura 24. Não se espera que os erros nesta variável atinjam tal magnitude. Entretanto, diferenças entre as profundidades médias de reservatórios próximos a uma mesma estação meteorológica podem ser responsáveis por significativas disparidades entre os aproveitamentos no comportamento sazonal da evaporação, mesmo tendo estes contado com séries históricas idênticas de insolação, umidade relativa do ar e temperatura do ar.

Figura 24 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na profundidade média do reservatório.



4.1.5. Temperatura média do ar

Para verificação da sensibilidade do modelo CRLE à variações no parâmetro temperatura média do ar, variaram-se todos os valores individuais mensais de temperatura (e consequentemente da temperatura mé-

dia de todo o período) em -50%, -10%, +10% e +50%, o que corresponde a uma faixa consideravelmente superior aos erros esperados para tal variável. Conforme ilustrado na figura 25, verificou-se uma relação próxima da linearidade, onde uma variação positiva de 1% na temperatura média corresponde a um incremento de cerca de 0,42% na AET média para o período. Os valores tendem a seguir um mesmo padrão de flutuação sazonal ao longo do ano, com variações proporcionais aos valores de AET para cada mês, como se observa na figura 26.

Figura 25 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na temperatura média da série histórica de entrada.

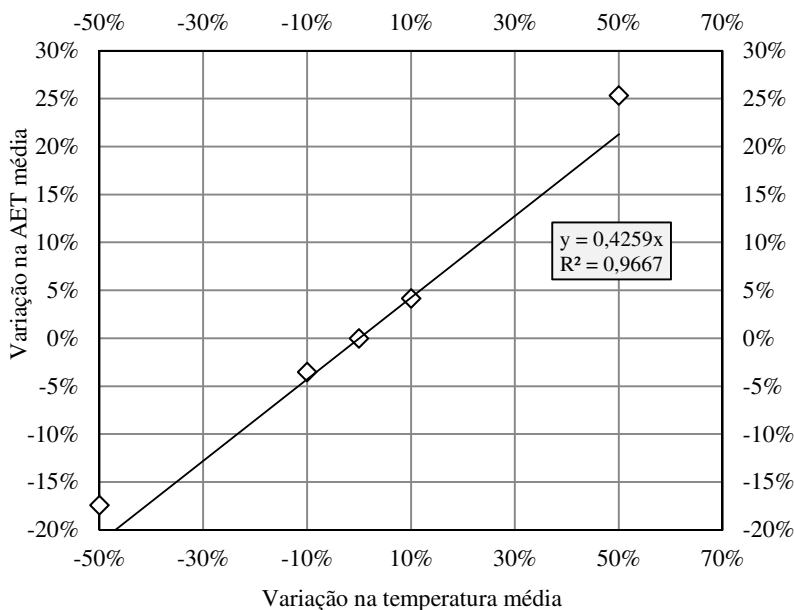
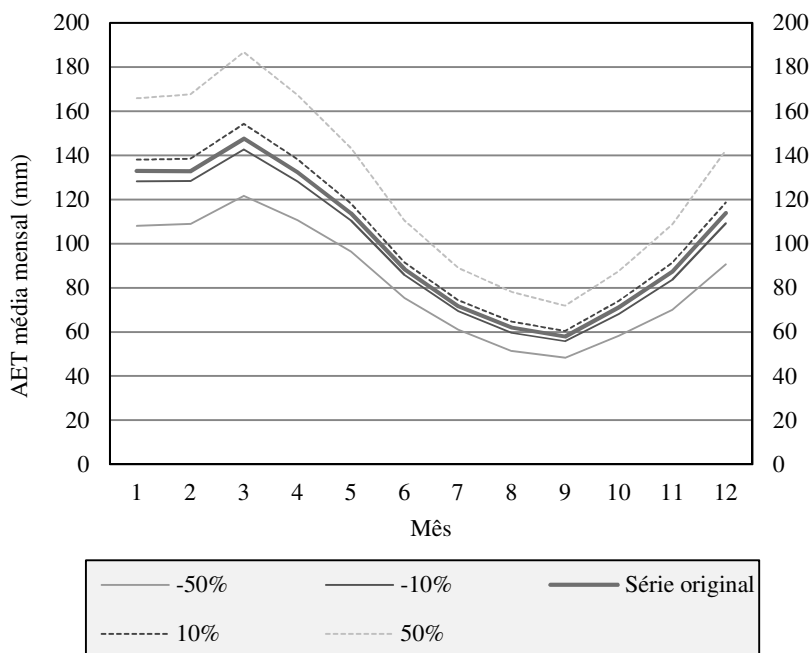


Figura 26 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na temperatura média da série histórica de entrada.



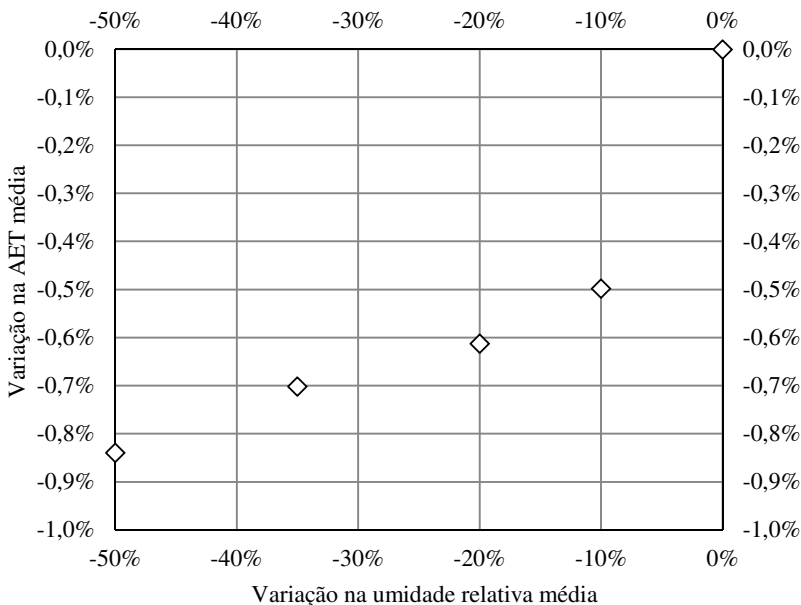
4.1.6. Umidade relativa média do ar

Devido à limitação quanto ao valor máximo da umidade relativa do ar (100%), os valores mensais para este parâmetro foram alterados em -10%, -20%, -35% e -50%, analogamente ao procedimento realizado para a temperatura média do ar. Conforme ilustrado na figura 27, uma redução de 50% nos valores de umidade relativa do ar correspondem a diminuição de 0,84% na AET média estimada para o período, havendo portanto uma sensibilidade desprezível àquele parâmetro.

Tal comportamento pode ser justificado quando retomado o conceito de efeito oásis, elucidado na seção 3.3.1 e descrito por Bouchet (1963) e Morton (1983a). De acordo com tal interpretação, em corpos d'água de dimensões suficientemente amplas, a evaporação influencia na umidade da camada de ar imediatamente acima da superfície d'água. Como consequência, estes lagos e reservatórios criam seu próprio ambiente, cuja umidade possui mínima dependência da umidade

nos ambientes terrestres adjacentes, onde costumam ser gravadas séries históricas deste parâmetro.

Figura 27 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na umidade relativa média da série histórica de entrada.



4.1.7. Insolação

Morton (1983a) indica que a insolação consiste no parâmetro ao qual os diferentes módulos do WREVAP (CRAE, CRWE e CRLE) possuem maior sensibilidade. De maneira análoga ao descrito na seção 4.1.5 para a temperatura média do ar, variou-se este parâmetro em -50%, -10%, +10% e +50%. Conforme se verifica na figura 28, a resposta do modelo tende a ser linear para a faixa de valores testados. Observa-se que um incremento de 1% no valor das insolações mensais resulta em um aumento de cerca de 0,54% na AET média do período correspondente. Tal como o observado para o parâmetro temperatura média do ar, as variações se distribuem ao longo do ano proporcionalmente aos valores médios de AET para cada mês, conforme ilustrado na figura 29.

Figura 28 – Variação da AET média anual estimada pelo CRLE de acordo com a variação na insolação média da série histórica de entrada.

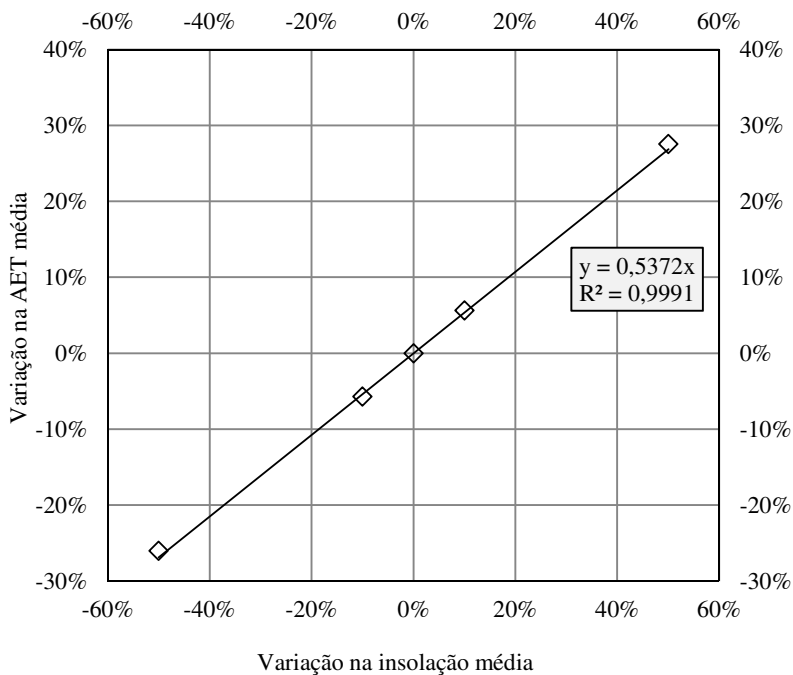
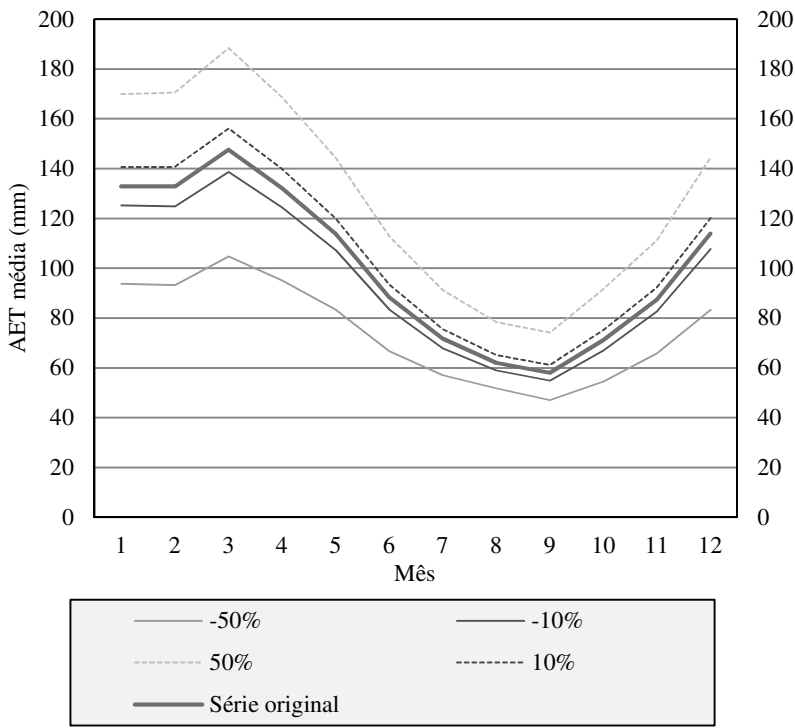


Figura 29 – Variação das AET médias mensais estimadas pelo CRLE de acordo com a variação na insolação média da série histórica de entrada.



4.2 ESTIMATIVAS DE EVAPORAÇÃO

A figura 30 ilustra as evaporações anuais estimadas nos reservatórios individuais e a interpolação realizada de modo a abranger toda a região Sul do Brasil. É provável que as isolinhas localizadas no sudoeste do Rio Grande do Sul superestimem as evaporações devido à ausência de pontos para interpolação na região, sendo prudente desconsiderá-las para efeitos de análise. Verifica-se uma tendência de aumento da evaporação de lago média anual à medida que os reservatórios se distanciam do litoral, com valores máximos ocorrendo nos aproveitamentos localizados ao Norte e Oeste do estado do Paraná. Os aproveitamentos localizados ao longo da Serra Geral apresentaram, de modo geral, valores inferiores de AET. Tal fenômeno pode ser associado às menores temperaturas médias em tais regiões, assim como a menores insolações médias diárias devido ao relevo montanhoso. Entretanto, não se verifica uma correlação clara entre as altitudes dos reservatórios – para as quais se adotaram as respectivas cotas dos reservatórios a montante em seus níveis máximos de operação – e as respectivas AET médias anuais, conforme ilustrado na figura 31.

Figura 30 – Isolinhas com intervalo de 50 mm a partir da interpolação, pelo critério *Inverse Distance Weighting (IDW)*, das evaporações de lago médias anuais estimadas a partir dos resultados do modelo WREVAP.

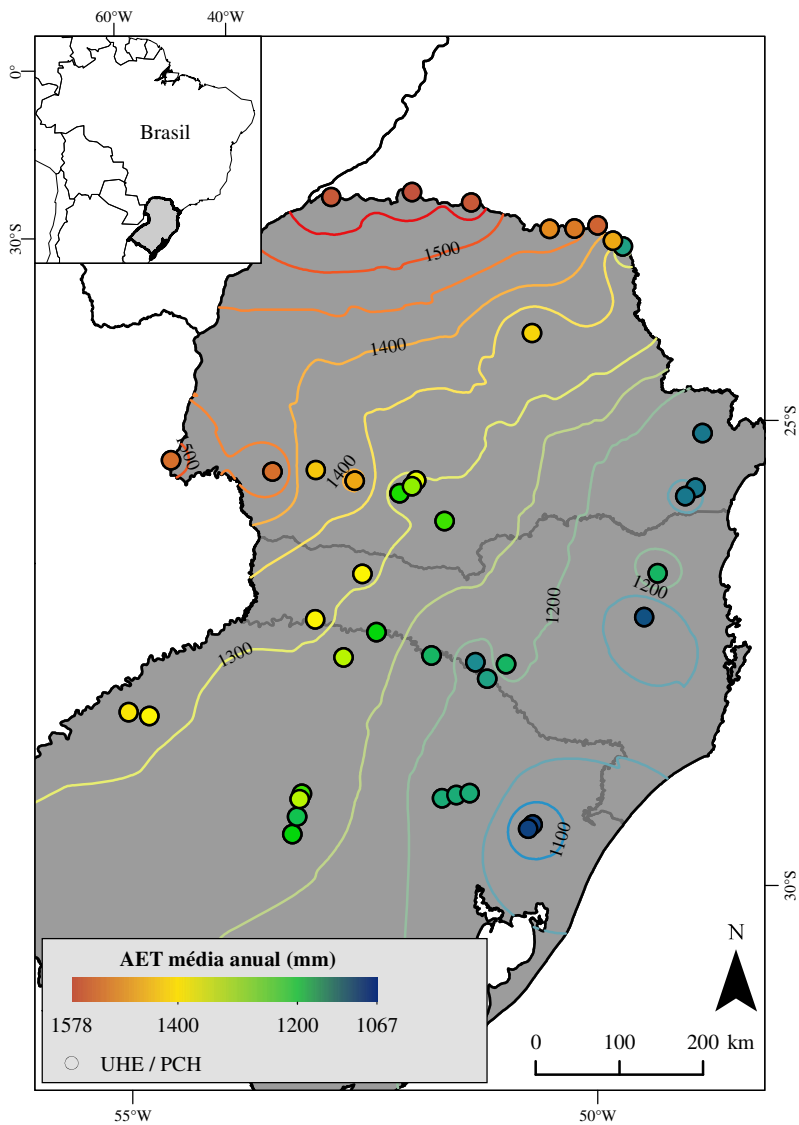
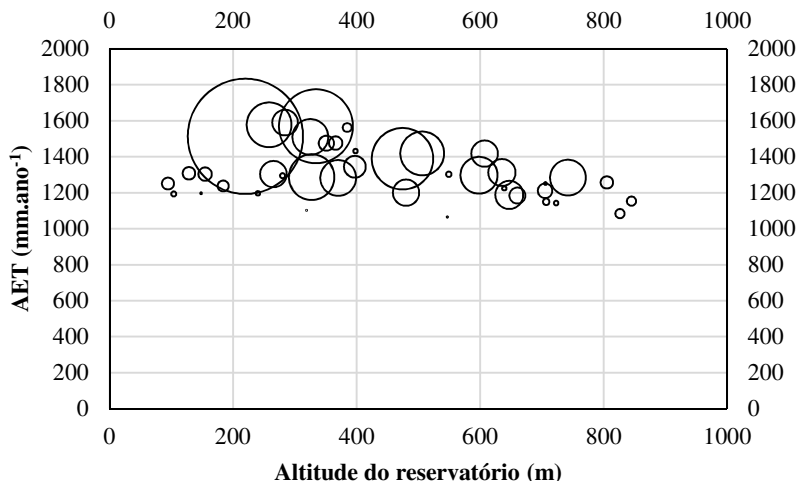


Figura 31 – Evaporação de lago média anual e altitude do reservatório – círculos proporcionais às respectivas áreas alagadas.

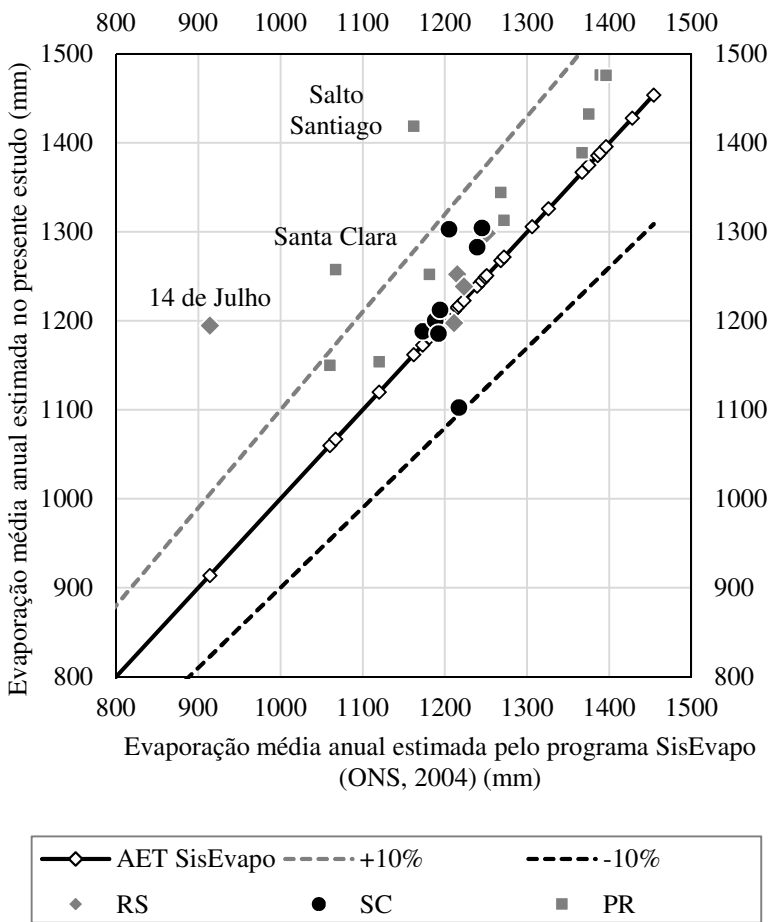


Conforme mencionado na seção 2.4, o ONS produziu estimativas de evaporação em reservatórios de UHE brasileiras baseado na relação complementar de Morton – na ocasião empregou-se o programa SisEvapo para tal propósito. As principais diferenças metodológicas entre o referido estudo e o presente consistem no fato de que as estimativas produzidas pelo ONS basearam-se em normais climatológicas produzidas a partir de dados de 111 estações para o período 1931 – 1960, as quais foram posteriormente regionalizadas para os locais dos aproveitamentos hidrelétricos – sendo assim, características como profundidade média e salinidade não foram levadas em consideração.

A figura 32 fornece uma comparação entre os resultados obtidos pelo referido estudo e pelo presente trabalho. Observa-se que, de modo geral, as diferenças absolutas entre as estimativas foram inferiores a 10%. Para os aproveitamentos 14 de Julho (RS), Santa Clara (PR) e Salto Santiago (PR), os valores estimados pelo WREVAP excederam em mais de 10% as estimativas do SisEvapo. Tais distorções podem ser associadas a erros nas séries históricas das respectivas estações utilizadas. Salienta-se, entretanto, que suas influências nas respectivas pegadas hídricas são limitadas face à acentuada variabilidade na produção de energia, conforme discutido na seção 4.3.2 – e, para o caso da UHE

Santa Clara, também de *outliers* de geração mensal, conforme seção 4.3.3.

Figura 32 – Comparação entre estimativas de evaporação real geradas pelo algoritmo WREVAP desagregadas por estado e pelo modelo SisEvapo (ONS, 2004).



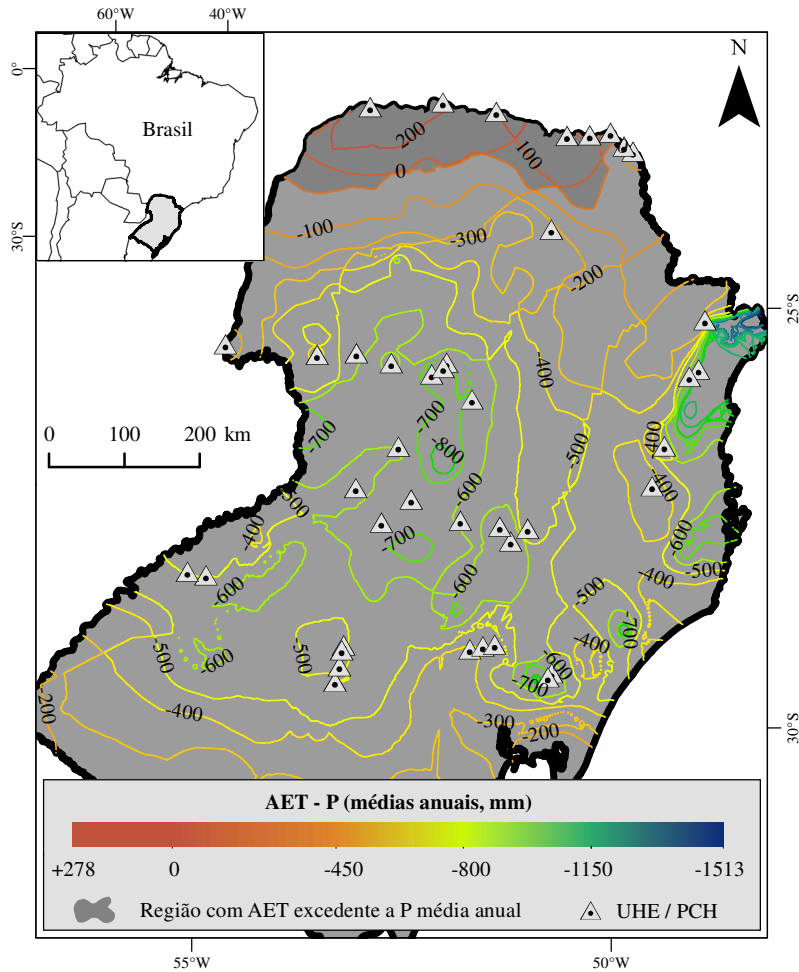
Apesar da boa concordância entre as estimativas de evaporação do presente estudo e as do ONS (2004), observaram-se significativas diferenças entre os valores médios mensais de ambos. Tal constatação vai ao encontro do relatado por McMahon *et al.* (2013a). Estes observa-

ram um deslocamento de fase entre estimativas de evaporação geradas a partir do CRWE (que não considera a profundidade e salinidade dos corpos d'água) e a partir do CRLE, ressaltando que ambas são praticamente iguais para uma resolução temporal anual, dado que nesta escala não ocorrem mudanças significativas no armazenamento de calor em lagos.

A partir da diferença entre os valores interpolados das estimativas de evaporação média anual nos lagos dos aproveitamentos considerados (ilustrados na figura 30) e a interpolação de isoietas de precipitação média anual para a mesma região (CPRM, 2010), pode-se estimar o balanço entre estes dois componentes em corpos d'água na região Sul. Tal estimativa é ilustrada na figura 40. Observa-se que, em cerca de 95% da área abrangida pelo estudo, o volume médio precipitado anualmente sobre corpos d'água excede a evaporação de lago estimada. A área na qual isso não ocorre se resume ao extremo Norte do estado do Paraná ao longo do Rio Parapanema, abrangendo, em ordem de montante para jusanta as usinas hidrelétricas: Salto Grande, Canoas II, Canoas I, Capivara, Taquaruçu e Rosana.

Esta constatação é particularmente relevante quando considerada a formulação para a determinação da pegada hídrica dada pela fórmula (3), segundo a qual a precipitação sobre cada reservatório deve ser descontada da evaporação estimada. Neste caso, 35 dos 41 aproveitamentos hidrelétricos considerados apresentariam pegadas hídricas negativas (quando considerada a escala de tempo anual).

Figura 33 – Diferença entre evaporação média anual em lago (AET_{mm}) e precipitação média anual (P).



Elaborado a partir de dados produzidos e de CPRM (2010).

4.3 ESTIMATIVAS DE PEGADAS HÍDRICAS

4.3.1. Variabilidade espacial

A figura 34, a figura 35 e a figura 36 ilustram as pegadas hídricas estimadas para aproveitamentos localizados nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina⁸ e Paraná, respectivamente, após exclusão de *outliers*, em ordem crescente de acordo com as médias simples de cada aproveitamento. Observa-se uma ampla distribuição de valores médios mensais para as diferentes UHE, de $0,05 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ para o aproveitamento de Salto Pilão, localizado em Santa Catarina, até $154,06$ para a UHE Passo Real, localizada no Rio Grande do Sul. A reduzida pegada hídrica estimada para o aproveitamento de Canastra é atribuída ao fato de a este aproveitamento ter sido atribuído somente o reservatório imediatamente a montante, que possui reduzida área superficial ($0,05 \text{ km}^2$), apesar de a referida UHE estar inserida em um sistema com diversos outros lagos, conforme discutido na seção 3.2.1. Já baixo valor para a pegada hídrica do aproveitamento Salto Pilão pode ser associado a suas particularidades em termos de projeto, abordadas na seção 3.2.2. Hipóteses para tal variabilidade são levantadas na seção 4.3.4. A média simples para as pegadas hídricas de todos os aproveitamentos é de **$22,35 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$** . Desconsiderando-se a precisão dos levantamentos, trata-se de valor igual à estimativa internacional frequentemente citada de $22 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ (GLEICK, 1993 apud GERBENS-LEENES *et al.*, 2009). A média ponderada pela energia média anual gerada pelos aproveitamentos corresponde a **$14,89 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$** . Todavia, tal valor é superior à média de $4,72 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ (17.000 L/MWh) observada por Fthenakis e Kim (2010) para os EUA. Herath *et al.* (2011), utilizando a mesma metodologia do presente estudo, estimaram uma média ponderada de $6,05 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ para usinas hidrelétricas na Nova Zelândia, e Mekonnen e Hoekstra (2012), ao analisarem 35 usinas hidrelétricas em distintos países do mundo, obtiveram um valor médio de $68 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$.

Conforme abordado na seção 2.3, Bueno (2015) estimou pegadas hídricas de 20 entre as principais usinas hidrelétricas brasileiras, e constatou um valor médio de $82 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ ao utilizar a fórmula (1) como base. Dois dos aproveitamentos considerados pelo autor foram também abordados no presente estudo: UHE Itaipu e UHE Capivara. As respectivas

⁸ Os aproveitamentos de Barra Grande, Machadinho, Itá e Foz do Chapecó localizam-se ao longo da divisa entre RS e SC. Optou-se, para fins de apresentação, considerá-los no estado de SC.

pegadas hídricas médias estimadas por Bueno (2015) para tais usinas foram de $5,3 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ e $62 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, enquanto no presente estas correspondem a $11,27 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ e $73,01 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$. Atribuem-se as diferenças ao fato de que o autor utilizou como dados de evaporação os produtos gerados pelo programa SisEvapo (ONS, 2004), os quais possuem diferenças metodológicas em relação ao presente, conforme previamente elucidado. Especificamente no que tange à UHE Itaipu, estipula-se também que o autor tenha utilizado critérios distintos para exclusão de *outliers* na série histórica de geração de energia da usina, que possuem grande influência nas estimativas de pegada hídrica, conforme será abordado na seção 4.3.3.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (2016a), o consumo de energia da rede pelas 9.561.792 residências atendidas no Sul do Brasil em 2015 foi de 20.353.435 MWh ou 73.272.366 GJ, correspondendo a um consumo de aproximadamente $7.66 \text{ GJ.domicílio}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Considerando-se que a pegada hídrica média ponderada de $14,89 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ seja representativa da energia gerada por todos os aproveitamentos hidrelétricos da região, pode-se depreender que a pegada hídrica média de um domicílio abastecido por energia oriunda em sua totalidade por este tipo de fonte seja de $108 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$, ou **312,7 L.dia⁻¹**. Considerando-se uma população de 29.230.180 habitantes para a região em 2015 (IBGE, 2016b), tem-se uma média de aproximadamente 3,1 habitantes por domicílio para o Sul do Brasil, estima-se uma pegada hídrica média de **102,3 L.hab⁻¹dia⁻¹** associada ao consumo de energia oriunda da hidroeletricidade.

Deve-se ressaltar, entretanto, que devido à acentuada variabilidade entre as pegadas hídricas dos aproveitamentos considerados no estudo, tal valor tende a possuir grandes diferenças dependendo da usina hidrelétrica na qual a energia é produzida – o que, devido ao funcionamento do Sistema Interligado Nacional, é frequentemente de difícil determinação. De qualquer modo, trata-se de um valor da mesma escala de grandeza e próximo às estimativas de consumo de água das redes de distribuição públicas, que em geral consistem em cerca de 120 L.dia^{-1} a 200 L.dia^{-1} (TSUTIYA, 2004), podendo excedê-la consideravelmente dependendo do aproveitamento hidrelétrico considerado. Tal observação justifica a crescente atenção dedicada à pegada hídrica da geração de energia.

Figura 34 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados no Rio Grande do Sul.

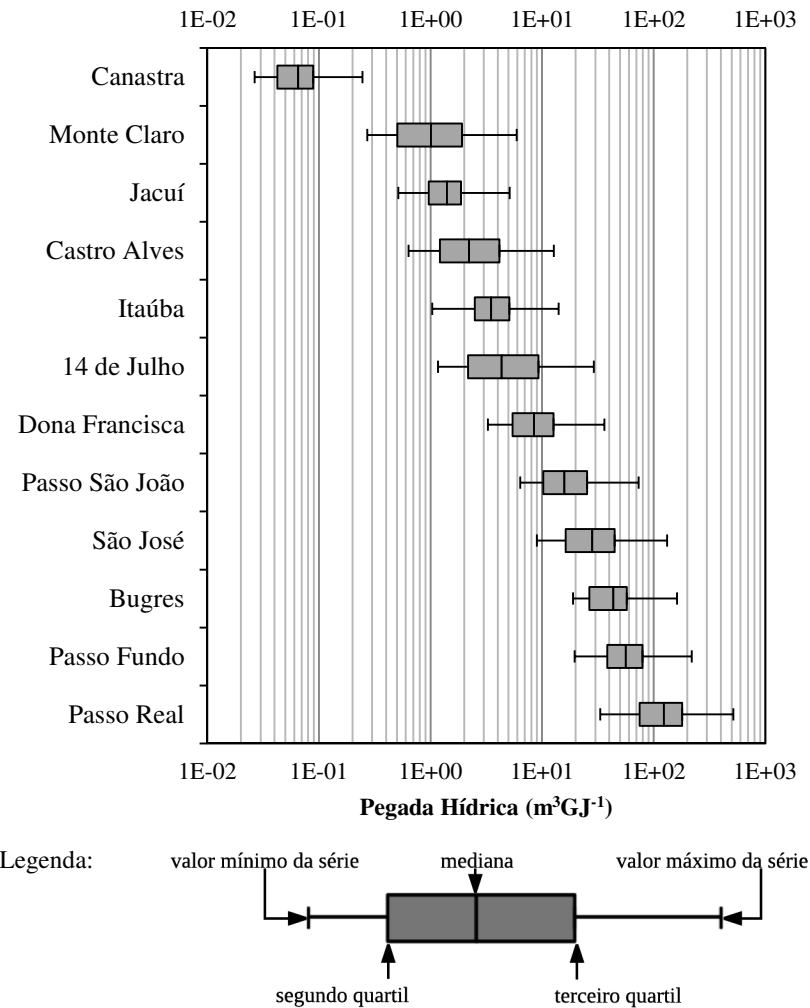


Figura 35 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados em Santa Catarina e divisas.

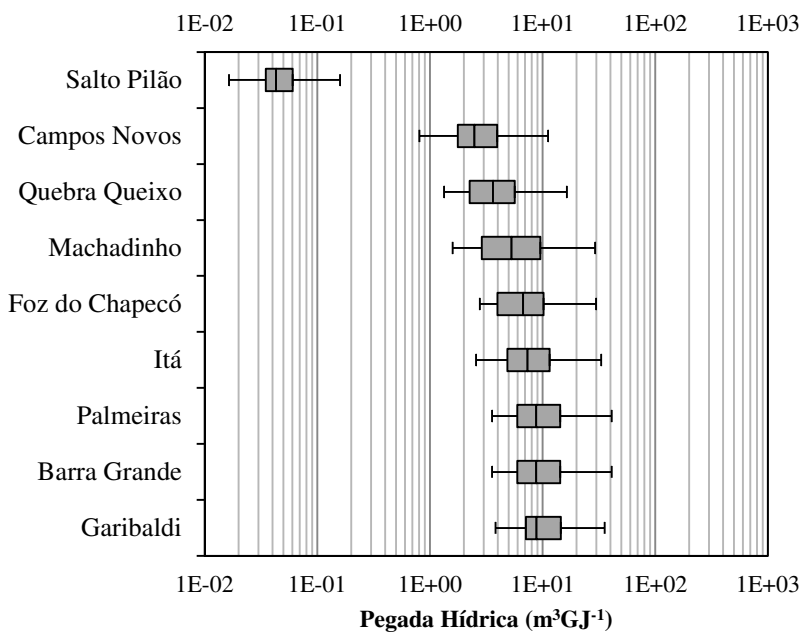
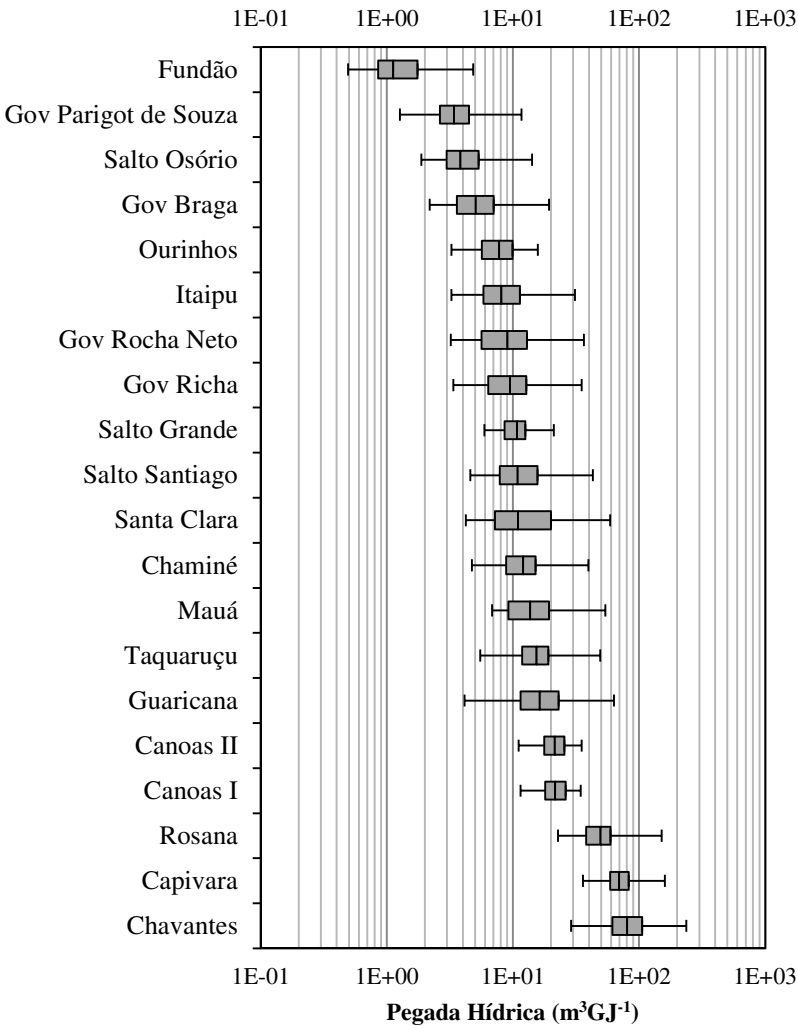
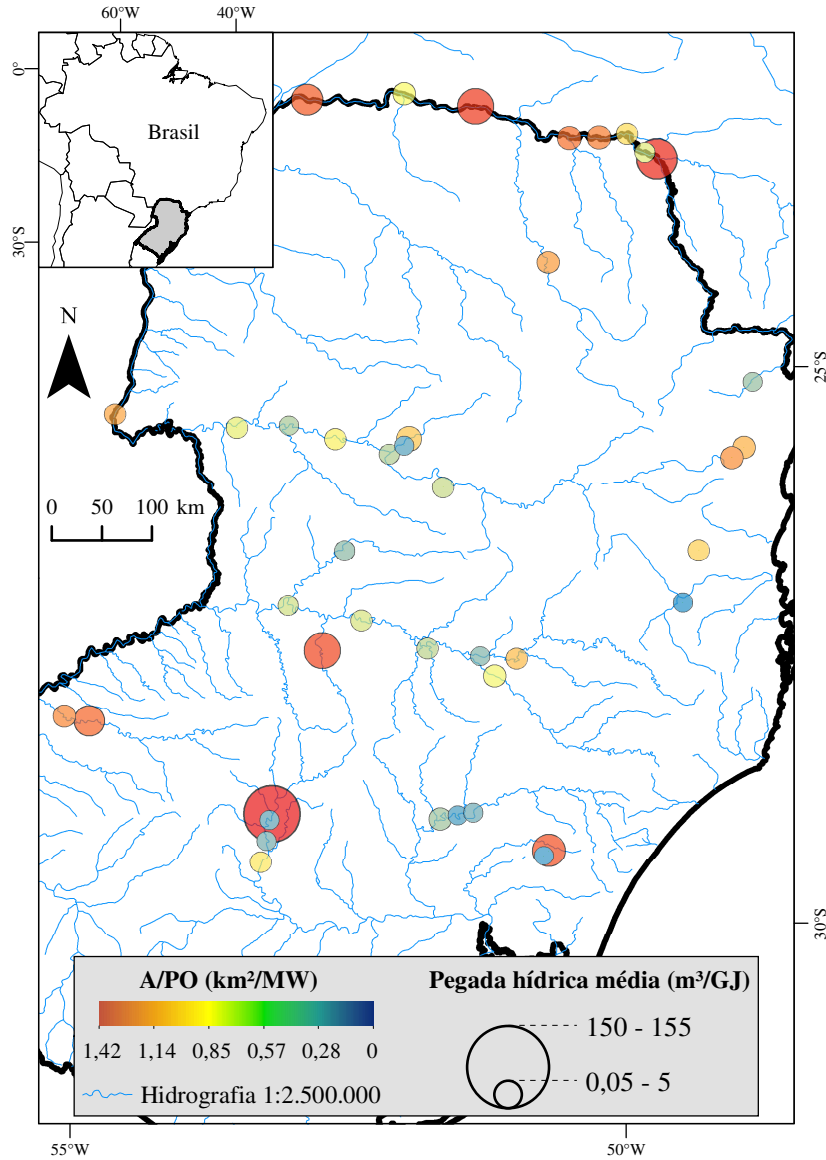


Figura 36 – Distribuição das pegadas hídricas estimadas para os aproveitamentos localizados no Paraná e divisas.



A figura 37 apresenta a distribuição espacial das pegadas hídricas médias estimadas para os aproveitamentos considerados no presente estudo, além das respectivas razões área alagada : potência outorgada – a relação entre esta e a pegada hídrica será discutida no item 4.3.4. Observam-se valores relativamente reduzidos para todos os aproveitamentos localizados em Santa Catarina – onde as PH médias não excederam $15 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$ – e no sul do Paraná. De outro modo, não se verifica um padrão evidente na distribuição das pegadas hídricas de acordo com as localizações dos aproveitamentos – em alguns casos, usinas localizadas imediatamente a jusante uma da outra em um mesmo rio apresentam discrepâncias significativas entre si. Tal comportamento é particularmente evidente nas usinas localizadas ao longo do rio Jacuí, na região central do Rio Grande do Sul, no sistema Salto, no nordeste do mesmo estado, e ao longo do rio Parapanema, na divisa entre os estados do Paraná e São Paulo.

Figura 37 – Distribuição espacial das pegadas hídricas médias mensais (de acordo com o tamanho dos círculos) e das relações área alagada / potência instalada (A/PO, de acordo com a escala de cores).



Elaborado a partir de dados produzidos e de Brasil (2016) (hidrografia)

4.3.2. Variabilidade temporal

Analisando-se cada usina individualmente, também se verifica uma significativa variação entre os valores mensais estimados. A tabela 4 explicita tal variabilidade ao apresentar a pegada hídrica mínima, média e máxima, além do desvio padrão e do coeficiente de variação dos 41 aproveitamentos considerados no presente estudo.

Tabela 4 – Pegada hídrica mínima (PH min), média (PH med) e máxima (PH max), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) por aproveitamento hidrelétrico.

UHE	PH min (m ³ /GJ)	PH med (m ³ /GJ)	PH max (m ³ /GJ)	DP (m ³ /GJ)	CV
14 de Julho	2,40	25,14	191,38	100,45	4,00
Barra Grande	5,75	19,44	52,23	35,21	1,81
Bugres	22,53	58,36	93,75	104,87	1,80
Campos Novos	1,57	3,99	9,91	4,52	1,13
Canastra	0,03	0,08	0,13	0,05	0,69
Canoas I	18,88	26,49	33,64	6,23	0,24
Canoas II	17,22	23,83	29,62	5,74	0,24
Capivara	58,57	78,26	97,00	22,08	0,28
Castro Alves	1,13	5,12	14,23	6,75	1,32
Chaminé	8,48	16,64	47,41	53,69	3,23
Chavantes	45,96	76,01	111,93	33,66	0,44
Dona Francisca	3,25	7,51	11,88	7,35	0,98
Foz do Chapecó	3,93	9,05	19,29	8,77	0,97
Fundão	1,59	3,01	7,27	7,23	2,40
Garibaldi	5,06	11,74	21,50	7,62	0,65
Gov Rocha Neto	6,24	11,96	20,50	16,39	1,37
Gov Richa	5,87	10,98	17,78	7,02	0,64
Gov Braga	3,52	5,54	8,74	3,40	0,61
Gov Parigot de Souza	2,89	3,86	4,71	1,70	0,44
Guaricana	10,88	15,43	22,89	14,55	0,94
Itá	4,50	10,03	16,61	8,48	0,85
Itaipu	5,21	8,64	12,98	9,17	1,06

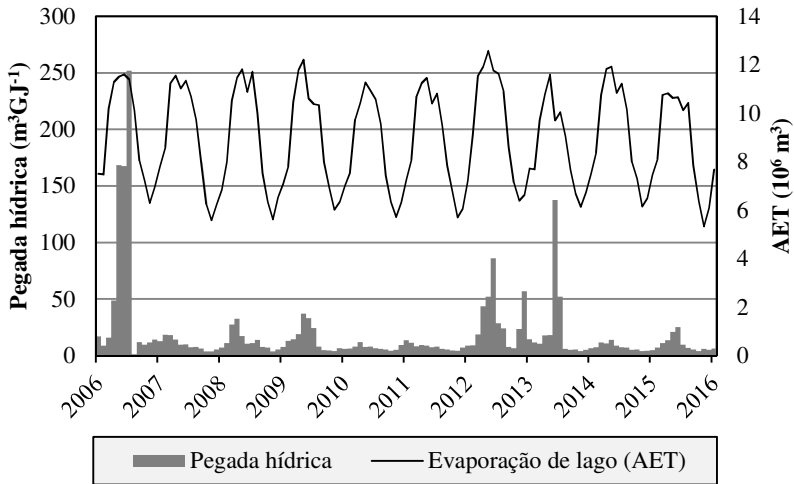
UHE	PH min (m³/GJ)	PH med (m³/GJ)	PH max (m³/GJ)	DP (m³/GJ)	CV
Itaúba	2,26	4,47	8,56	5,40	1,21
Jacuí	0,73	1,53	2,22	1,24	0,81
Machadinho	3,30	10,07	26,62	21,41	2,13
Mauá	6,75	22,17	63,10	27,00	1,22
Monte Claro	0,77	6,72	23,81	23,97	3,57
Ourinhos	4,90	8,39	11,02	2,75	0,33
Palmeiras	8,76	14,53	21,00	13,15	0,91
Passo Fundo	37,17	72,27	129,21	88,73	1,23
Passo Real	71,56	155,52	270,63	128,02	0,82
Passo São João	9,55	24,15	54,71	15,93	0,66
Quebra Queixo	2,65	5,80	10,81	6,01	1,04
Rosana	41,84	62,30	82,58	24,74	0,40
Salto Grande	8,71	12,60	15,68	3,09	0,25
Salto Osório	2,58	4,34	6,30	3,11	0,72
Salto Pilão	0,03	0,05	0,10	0,04	0,82
Salto Santiago	8,50	13,99	19,38	10,99	0,78
Santa Clara	8,29	31,47	66,06	69,26	2,20
São José	14,14	47,15	116,68	64,02	1,36
Taquaruçu	19,24	24,12	33,36	9,30	0,39

As séries históricas de AET estimada apresentaram um padrão anual relativamente regular. Em contraste, de modo de geral as gerações de energia pelos diversos aproveitamentos apresentaram variações dramáticas ao longo do tempo, sem um comportamento periódico identificável. Tais comportamentos são ilustrados para o aproveitamento de Barra Grande (SC), a título de exemplo, na

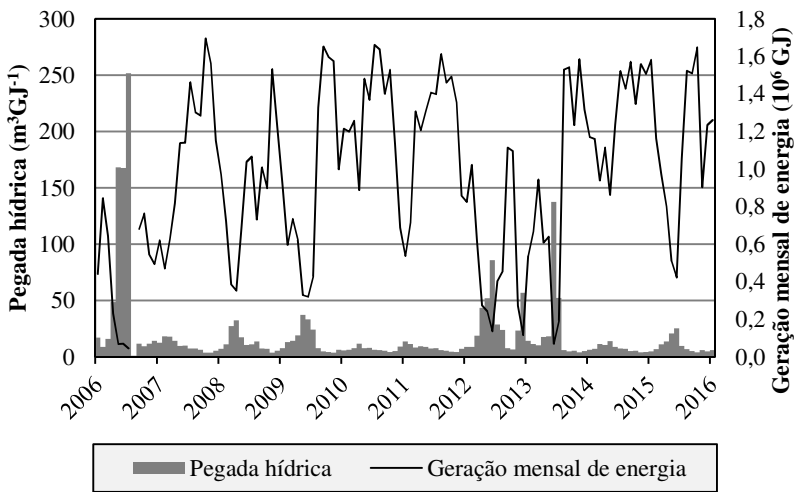
figura 38. No gráfico (b) desta, observa-se a coincidência entre os picos da série de pegadas hídricas e os meses nos quais houve reduções significativas na quantidade de energia gerada. Deste modo, depreende-se que a variabilidades observadas na pegada hídrica estão principalmente associadas às variações na produção de energia.

Figura 38 – Séries históricas de (a) AET e (b) geração mensal de energia comparadas às pegadas hídricas mensais do aproveitamento de Barra Grande, Santa Catarina.

(a) AET



(b) Geração mensal de energia

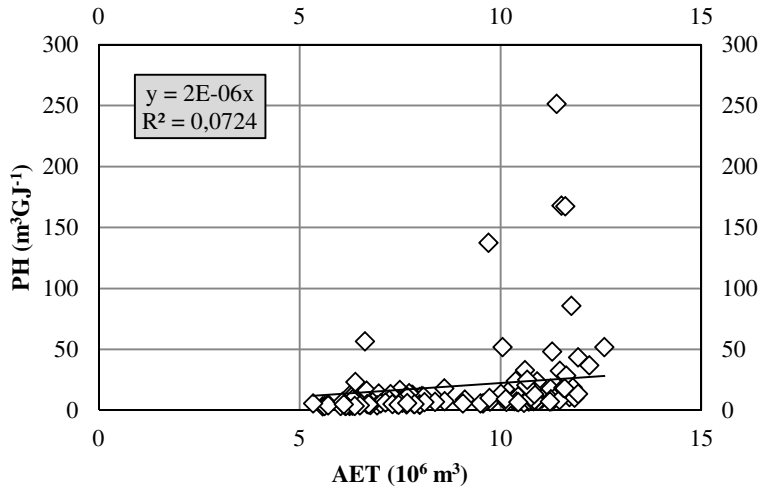


Tal constatação se torna evidente quando os dados de geração mensal e respectivas pegadas hídricas são comparados, na figura 39(b), observando-se que, de acordo com a equação 1, para uma suposta evaporação mensal constante, a pegada hídrica é linearmente proporcional ao inverso da energia produzida. A verificação da exacerbada influência de variações na geração de energia pode ser comparada à constatação por Gleick (1992) de que usinas operadas consideravelmente abaixo de sua capacidade na maior parte do tempo tendem a possuir impactos ambientais elevados.

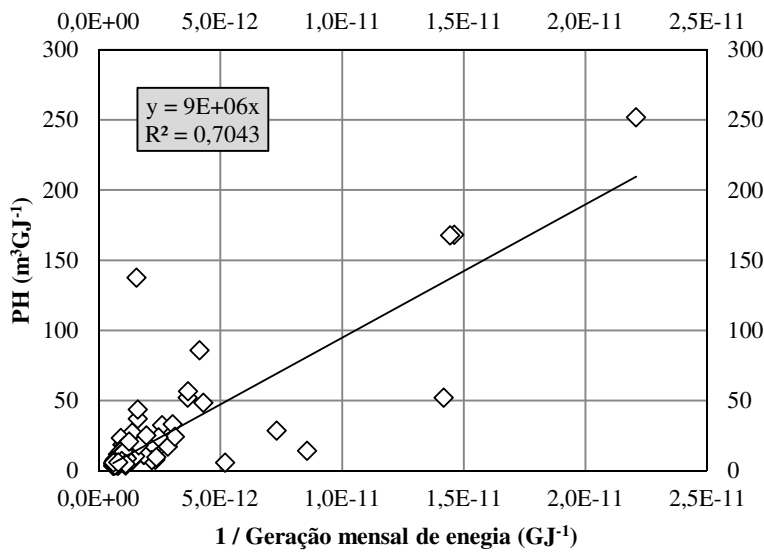
Entretanto, pondera-se que, caso sejam consideradas as variações temporais nas áreas superficiais dos reservatórios, é provável que a evaporação venha a apresentar um padrão temporal menos regular e que as influências relativas desta e da produção de energia sejam distintas das aqui constatadas.

Figura 39 – Regressões entre (a) AET e (b) inverso da geração mensal de energia às respectivas pagadas hídricas mensais do aproveitamento de Barra Grande, Santa Catarina.

(a) AET



(b) Geração mensal de energia

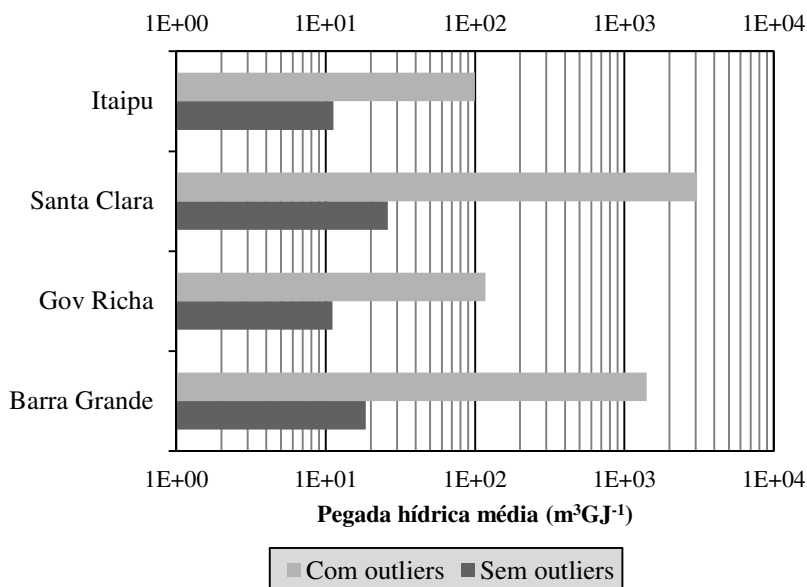


4.3.3. Distorções causadas por meses com geração excepcional de energia

Utilizaram-se, para a maior parte dos aproveitamentos, as séries históricas inalteradas de geração mensal de energia fornecidas pela ANEEL (2016b) – com exceção da conversão de unidades de MWh para GJ, conforme adotado por Mekonnen e Hoekstra (2012). Entretanto, tais dados apresentaram um ou mais meses com geração de energia nula para as UHE Machadinho, Chaminé, 14 de Julho, Governador Parigot de Souza, Monte Claro, São José e Guaricana. Tais meses não tiveram suas pegadas hídricas computadas.

Outros aproveitamentos apresentaram alguns meses com geração até quatro ordens de grandeza inferiores aos valores médios mensais. Apesar de sua baixa frequência, tais anormalidades levaram a picos de pegada hídrica nos meses em que ocorreram, e consequentemente a aumentos de uma a duas ordens de grandeza nos valores médios de PH dos respectivos aproveitamentos, conforme ilustrado na figura 40. Estes *outliers* também foram excluídos das estimativas de pegadas hídricas.

Figura 40 – Pegadas hídricas médias estimadas para UHE selecionadas considerando-se e excluindo-se meses com geração excepcionalmente baixa de energia.



O quadro 4 ilustra os meses para os quais as gerações de energia foram desconsideradas na estimativa das pegadas hídricas.

Quadro 4 – Meses com geração de energia considerada excepcionalmente baixa.

UHE	Meses
Itaipu	05/1984 a 03/1985; 05 e 06/1985
Santa Clara	08/2006
Gov. Richa	08/2006
Barra Grande	08/2006

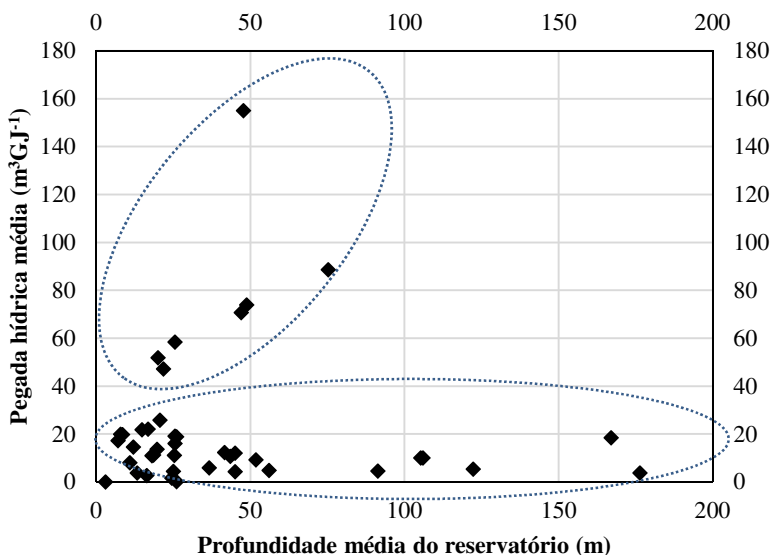
4.3.4. Correlações entre características dos reservatórios e respectivas pegadas hídricas

Em linha com o segundo objetivo específico do presente trabalho, as pegadas hídricas dos 41 aproveitamentos hidrelétricos considerados foram associadas a características construtivas e de localização de modo a se identificarem possíveis correlações. Tais comparações são apresentadas nos itens a seguir.

4.3.4.1. Profundidade média

Conforme observado na seção 3.3, as profundidades médias dos reservatórios foram adotadas ou estimadas de acordo com a disponibilidade de dados. No presente estudo se verificou a existência de dois conjuntos distintos: um para o qual a pegada hídrica tende a aumentar de acordo com a profundidade média do reservatório e outro para o qual não existe correlação evidente entre tais variáveis, conforme ilustrado na figura 41.

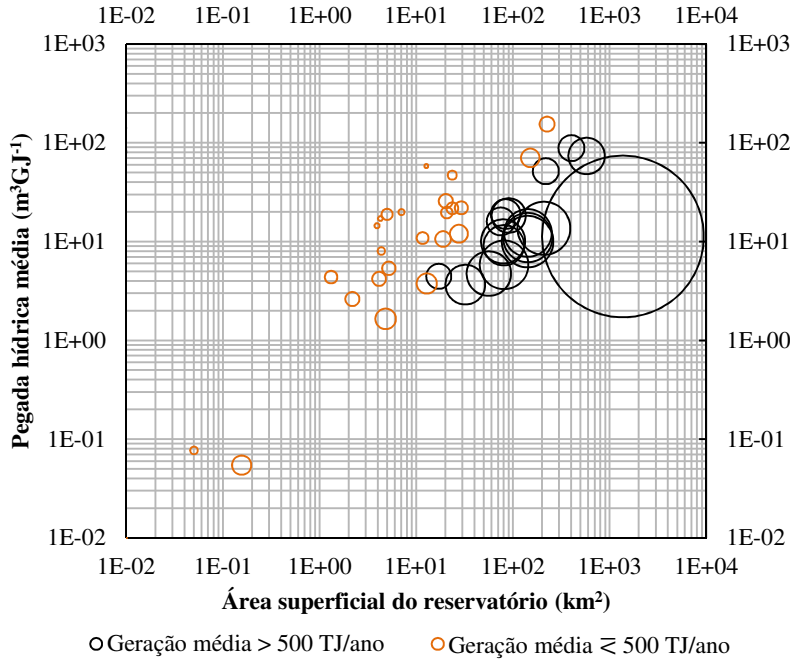
Figura 41 – Pegada hídrica média de acordo com a profundidade média do reservatório.



4.3.4.2. Área superficial

Conforme explicitado pela equação (4), existe uma relação de proporcionalidade linear entre o volume evaporado em um reservatório – e, consequentemente, à pegada hídrica do respectivo aproveitamento hidrelétrico – e sua área superficial. Entretanto, observa-se paralelamente uma tendência geral de que aproveitamentos com reservatórios de maior área possuam maior geração de energia. Ambas as tendências são ilustradas na figura 42, na qual o maior círculo corresponde à usina hidrelétrica de Itaipu. Verifica-se que aproveitamentos com maior geração de energia possuem em geral valores inferiores de pegada hídrica quando comparados a outros de área superficial próxima, irrespectivamente das taxas de evaporação em cada reservatório. Tal observação reforça a conclusão de que, para as UHE e PCH consideradas, a energia produzida consiste em um fator de maior preponderância na pegada hídrica que a evaporação local.

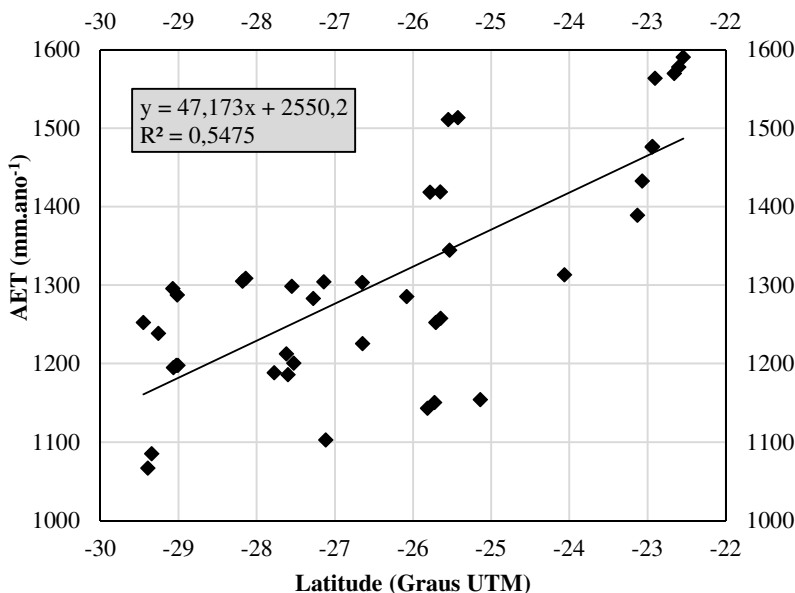
Figura 42 – Pegada hídrica média de acordo com a área superficial do reservatório – círculos proporcionais à geração média anual de energia.



4.3.4.3. Latitude

A latitude possui influências diretas e indiretas na evaporação em corpos d'água através, por exemplo, da insolação e das temperaturas médias do ar, respectivamente. Conforme observado na seção 4.1, o modelo WREVAP possui sensibilidade relativamente elevada a ambos os parâmetros. As pegadas hídricas dos aproveitamentos hidrelétricos considerados no presente estudo, de acordo com as respectivas latitudes, são ilustradas na figura 43. Observa-se que, para a amostra considerada, a correlação entre as variáveis é visível porém não forte. Pode-se depreender que o intervalo de latitudes abrangido pelas UHE utilizadas (-22,54° a -29,45° UTM) seja insuficiente para tornar mais evidente a influência da do parâmetro nas pegadas hídricas, as quais tendem a ser influenciadas predominantemente pelas variações na geração de energia.

Figura 43 – Pegada hídrica média de acordo com a latitude do aproveitamento hidrelétrico.



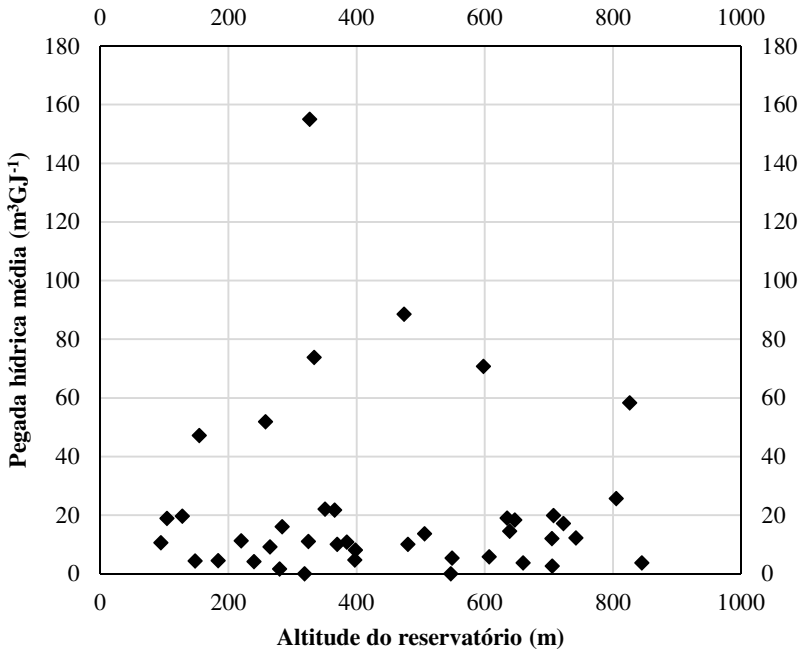
Vicente-Serrano *et al.* (2007) observaram que, além da latitude, diferenças topográficas podem levar a variações consideráveis na distribuição espacial da radiação solar incidente. Isto tende a acarretar em distorções significativas nas estimativas de evaporação no caso de se

adotarem séries históricas medidas em um local distinto da área de interesse. Tal fator não tem sido considerado em estudos voltados à estimativa de pegadas hídricas, e, portanto, não foi incluído no presente estudo. Entretanto, sugere-se que tal hipótese seja verificada em futuros trabalhos.

4.3.4.4. Altitude

Conforme identificado na seção 4.1.1, o programa WREVAP apresenta reduzida sensibilidade ao parâmetro altitude. Consequentemente, não se espera que as pegadas hídricas sejam significativamente influenciadas por este. A figura 44 apresenta as pegadas hídricas médias estimadas e os respectivos níveis d'água máximos operacionais dos reservatórios dos aproveitamentos considerados.

Figura 44 – Pegada hídrica média de acordo com a altitude do reservatório.

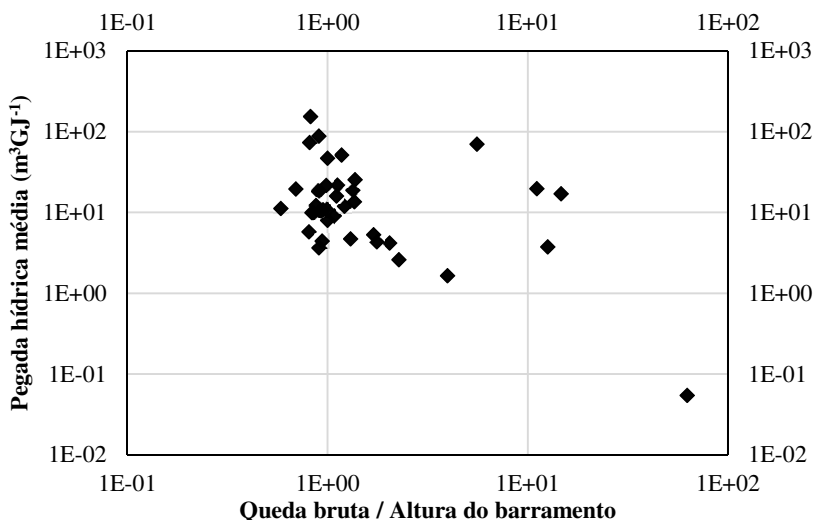


4.3.4.5. Relação queda bruta / altura da barragem

Conforme mencionado na seção 2.3, Gleick (1992) identificou a relação queda bruta / altura da barragem como um indicador de “custos ambientais” superior à capacidade instalada de cada aproveitamento. O autor observou que, quando tal proporção é superior a 1, as perdas por evaporação são “relativamente pequenas”. Tal hipótese foi testada no presente estudo, sendo ilustrada na figura 45. Verifica-se uma tendência geral de redução do valor das pegadas hídricas com o aumento da relação queda bruta / altura da barragem – não podendo ser negligenciada a considerável dispersão dos pontos. A PH média dos aproveitamentos para os quais a relação possui valor inferior a 1 é de $28,61 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$, enquanto para os demais a média é de $16,02 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$.

Destaca-se aqui a UHE Salto Pilão, que possui a maior relação (aproximadamente 62,7) e a menor pegada hídrica média ($0,05 \text{ m}^3\text{GJ}^{-1}$) entre todos os aproveitamentos considerados. Tal característica se vincula às características construtivas desta usina, conforme mencionado na seção 3.2.2.

Figura 45 – Pegada hídrica média de acordo com a relação queda bruta / altura da barragem do aproveitamento hidrelétrico.



Nota: Não foram encontrados valores de queda bruta para os aproveitamentos Bugres, Canastra e Palmeiras.

4.3.4.6. Potência outorgada

A potência outorgada consiste, juntamente com a área do reservatório, no parâmetro adotado pela legislação brasileira para diferenciação entre os portes de aproveitamentos hidrelétricos, conforme elucidado na seção 3.1. Esta classificação se reflete em aspectos legais, tais como os procedimentos para emissão de autorização para exploração de potencial hidráulico e o licenciamento ambiental.

Com base nos 41 aproveitamentos considerados no presente estudo, não se identificou uma correlação entre as pegadas hídricas e as respectivas potências outorgadas das PCH e UHE, conforme ilustrado na figura 46. Verificou-se, entretanto, que apesar das oscilações temporais citadas na seção 4.3.2 existe uma relação linear entre as potências outorgadas e as gerações médias anuais de energia. Esta é ilustrada na figura 47, da qual se excluiu a UHE Itaipu de modo a otimizar a visualização dos demais aproveitamentos em escala linear.

Figura 46 – Pegada hídrica média de acordo com a potência outorgada do aproveitamento hidrelétrico.

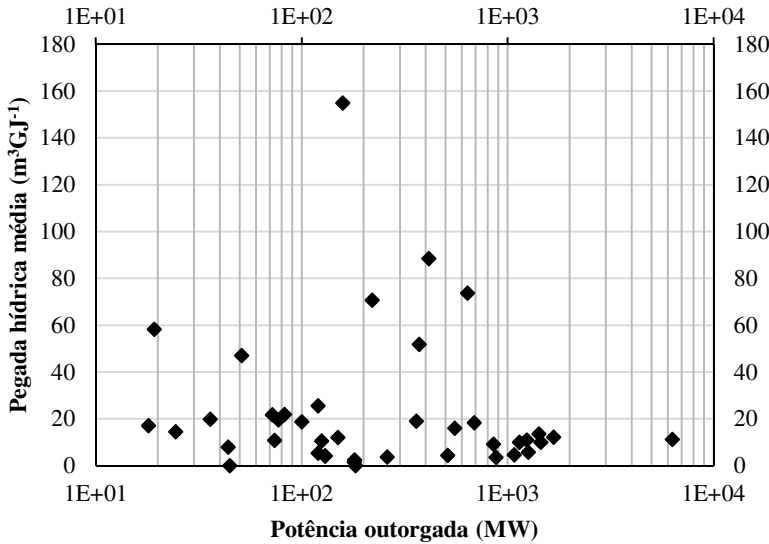
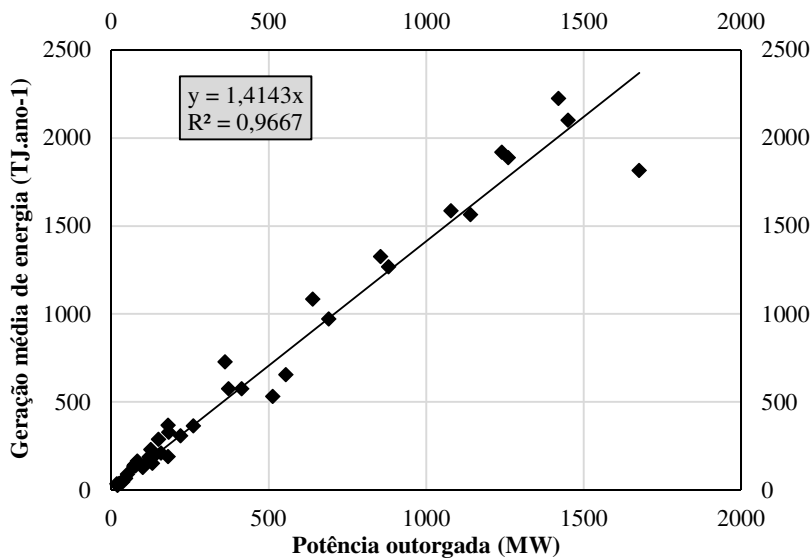


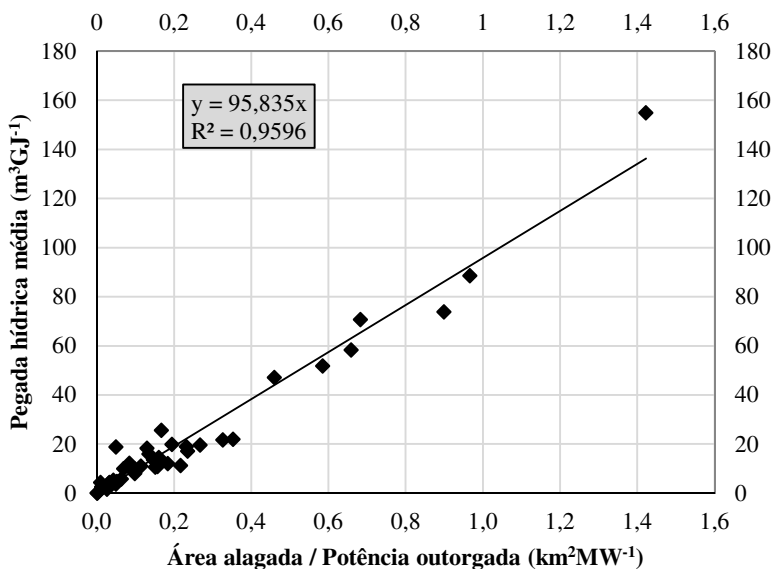
Figura 47 – Potência outorgada e geração média de energia ao longo do período considerado no estudo (excluindo Itaipu).



4.3.4.7. Relação área alagada / potência outorgada

A relação área alagada / potência instalada é frequentemente utilizada como indicador comparativo da performance ambiental de aproveitamentos hidrelétricos, dado que as perdas de vegetação e solo fértil constituem um dos principais impactos deste tipo de geração de energia. As perdas de água por evaporação podem ser consideradas linearmente proporcionais à superfície de um corpo d'água (em uma aproximação inicial, fórmula 4), e a energia gerada tende a ser proporcional à potência outorgada, como ilustrado na figura 47. Sendo assim, tal quociente pode ser considerado um indicador indireto da pegada hídrica de PCH e UHE. A figura 48 ilustra o bom ajuste obtido entre a pegada hídrica e a relação área alagada / potência outorgada para os aproveitamentos considerados. Desvios podem ser atribuídos às diferenças entre as taxas de evaporação em cada reservatório e às gerações efetivas de energia das usinas com respeito a suas capacidades instaladas.

Figura 48 – Pegada hídrica média e relação área alagada / potência outorgada.



5. CONCLUSÕES

5.1 LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS EMPREGADOS

Os valores para pegadas hídricas estimados no presente estudo possuem elevada dependência dos critérios metodológicos que foram adotados dentro de uma gama de possibilidades existentes, conforme discutido na seção 2.3. Como exemplo de tal sensibilidade, menciona-se a adoção da área total dos reservatórios em contraste à área incremental alagada além da calha natural dos rios, mencionada na seção 3.3. Tal opção resulta sozinha na duplicação da pegada hídrica estimada em aproveitamentos como a UHE Foz do Chapecó, na qual a execução do barramento resultou em um incremento relativamente pequeno (100%) da área alagada no local. Adicionalmente, conforme mencionado na seção 3.1, as variações nas superfícies de evaporação nos reservatórios ao longo do tempo foram negligenciadas, o que pode ter afetado significativamente os volumes evaporados. Deste modo, sugere-se que tal influência seja analisada em estudos futuros acerca do tema.

Um dos principais fatores determinantes para a adoção do algoritmo CRLE em detrimento de outros consiste no fato de não serem necessários dados coletados no local onde se pretende estimar a evaporação. Entretanto, a quantidade relativamente reduzida de estações meteorológicas com dados disponíveis publicamente resultou na necessidade de adoção, em alguns casos, de dados coletados por estações consideravelmente distantes (até 88 km) dos reservatórios em análise.

Destaca-se que as relações entre características dos aproveitamentos hidrelétricos e suas respectivas pegadas hídricas identificadas neste trabalho basearam-se em uma amostra cujas capacidades instaladas eram iguais ou superiores a 18 MW (PCH Chaminé). Sendo assim, a extrapolação de tais correspondências para aproveitamentos de menor porte deve ser realizada com cautela. Com exceção da UHE Itaipu, os aproveitamentos abordados no presente estudo possuem potência instalada igual ou inferior a 1.676 MW (UHE Governador Rocha Neto). Deste modo, também se sugere a aplicação de parcimônia a possíveis extrapolações realizadas a aproveitamentos com capacidade superior a esta.

5.2 ALTERNATIVAS PARA A MINIMIZAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA

Verificou-se no presente trabalho que as oscilações na geração de energia possuem grande influência nas pegadas hídricas de aproveita-

mentos hidrelétricos, independentemente de outros fatores. Conforme observado por Wilson *et al.* (2012), uma medida a ser considerada para a redução da pegada hídrica total da geração de energia hidrelétrica envolve o descomissionamento de aproveitamentos antigos em locais onde há disponibilidade de fontes de energia mais eficientes do ponto de vista hídrico. Os autores também sugerem a adição de turbinas a barramentos já existentes que não sejam atualmente utilizados para geração de energia.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Um dos principais objetivos da padronização dos impactos de geração de energia através da pegada hídrica consiste em permitir a comparação de diferentes métodos de geração. Conforme ilustrado na seção 2.1, estados como Santa Catarina e Rio Grande do Sul possuem uma significativa proporção da geração total de energia através de usinas termelétricas alimentadas por carvão mineral. Sendo assim, recomenda-se a determinação da pegada hídrica também desta fonte de energia de modo a subsidiar sua comparação à hidroeletricidade sob a perspectiva da eficiência de consumo de recursos hídricos.

Deve-se salientar a ação do Sistema Interligado Nacional (SIN), por meio da qual ocorre a redistribuição da energia gerada na maior parte do território nacional de modo a equiparar as demandas regionais de acordo com as possibilidades de geração em um dado momento. Pode-se considerar que o SIN acrescenta complexidades adicionais em ao menos duas esferas na determinação da pegada hídrica de geração de energia. Primeiramente, não se pode sempre identificar com facilidade a origem da energia fornecida a uma dada localidade – e principalmente a um consumidor final. Em segundo lugar, as perdas no sistema de transmissão, que também variam em função de diversos fatores, levam a uma redução na quantia de energia efetivamente fornecida e, consequentemente, a um aumento das pegadas hídricas dependendo de características da rede e da distância entre o ponto de produção e de consumo da energia.

Tais dinâmicas foram parcialmente identificadas por Pasqualetti e Kelley (2008), que no contexto dos EUA sugeriram que se analise se o retorno financeiro de usinas cuja eletricidade é exportada a outros estados compensa a água virtual incorporada a esta atividade. Ou seja, trata-se da incorporação da pegada hídrica a uma análise de custo-benefício de modo a comparar a geração de energia a possíveis outros usos de recursos hídricos. Neste contexto, os autores também sugerem a priori-

zação da geração de energia de regiões com maior disponibilidade hídrica, exportando-a a regiões onde exista escassez (PASQUALETTI e KELLEY, 2008), de modo análogo ao proposto por Allan (1998) com relação a alimentos. Considerando-se o exposto, sugere-se a realização de estudo com o objetivo de prover estimativas das magnitudes e direções de tais fluxos de água virtual, podendo vir a subsidiar possíveis modificações na cobrança pelo uso de recursos hídricos e no repasse desta aos consumidores finais.

A partir de uma quantificação acurada das pegadas hídricas dos geradores de energia, esta poderia servir como base para a aplicação da cobrança pelo uso consuntivo de recursos hídricos. Esta consiste em um instrumento estabelecido pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), e é defendida como uma maneira de encorajar a racionalização do uso da água por parte dos produtores (IEA, 2012), de aumentar a competitividade de fontes com baixa pegada hídrica (PASQUALETTI e KELLEY, 2008), além de fomentar o interesse dos geradores pelo conhecimento do consumo de água associado a suas operações e em maneiras de minimizá-lo.

Deve-se salientar que, conforme ilustrado na seção 2.1, os aproveitamentos hidrelétricos possuem papel fundamental na matriz energética do Brasil e nos estados da Região Sul. Ao mesmo tempo, o método empregado para estimativa da pegada hídrica desta fonte no presente estudo tem sido criticado na literatura por suas simplificações, as quais tendem a superestimar as perdas de água por unidade de energia gerada em comparação com outras fontes. Deste modo, os resultados apresentados devem ser interpretados como uma contribuição para a discussão acerca da quantificação das perdas de água associadas à hidroeletricidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, J. A. Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. **Ground Water**, v. 36, n. 4, p. 545-546, 1998. ISSN 1745-6584. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x> >.

_____. Virtual water-the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? **Water International**, v. 28, n. 1, p. 106-113, 2003. ISSN 0250-8060.

ALVARES, C. A. et al. Köppen climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Agência Nacional de Águas. Brasília. 2013

_____. **HidroWeb: Sistema de informações hidrológicas**. . 2015. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/> >. Acesso em: 21 out. 2015.

ANEEL. **Reservatório: UHE Salto Pilão**. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/100310 - Reservat%C3%B3rio UHE Salto Pil%C3%A3o.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/100310-Reservat%C3%B3rio%20UHE%20Salto%20Pil%C3%A3o.pdf) >. Acesso em: 17 jun. 2016.

_____. **Tabela 1 – Novos percentuais das áreas inundadas pelos reservatórios da UHE Bugres**. 20---. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/Excel/Tabela UHE Bugres.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/Excel/Tabela%20UHE%20Bugres.pdf) >. Acesso em: 16 jun. 2016.

_____. **Resolução Normativa n. 673, de 4 de agosto de 2015**: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015a.

_____. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**. 2015b. Disponível em: < <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html> >. Acesso em: 05 set. 2015.

_____. **Banco de Informações de Geração**. 2016a. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.asp> >. Acesso em: 21 maio 2016.

_____. **Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos**. 2016b. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/cmpf/gerencial/> >. Acesso em: 28 fev. 2016.

BAKKEN, T. H. et al. Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and large-scale hydropower and wind power projects. **Journal of Environmental Management**, v. 140, p. 93-101, 7/1/ 2014.

ISSN 0301-4797. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714001388> >.

BAKKEN, T. H. et al. Water consumption from hydropower plants – review of published estimates and an assessment of the concept. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 3983–4000, 2013. Disponível em: < <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/3983/2013/> >.

BERGER, M.; FINKBEINER, M. Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? **Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 919, 2010. ISSN 2071-1050. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/2071-1050/2/4/919> >.

BOUCHET, R. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. 1963.

BRASIL. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília 1997.

_____. **Download de dados geográficos**. 2016. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm> >. Acesso em: 03 março 2016.

BRUTSAERT, W.; PARLANGE, M. B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. **Nature**, v. 396, n. 6706, p. 30-30, 11/05/print 1998. ISSN 0028-0836. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1038/23845> >.

BUENDIA, C. et al. Using equilibrium temperature to assess thermal disturbances in rivers. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 19, p. 4350-4360, 2015. ISSN 1099-1085. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10489> >.

BUENO, E. D. O. **Evaporação do Reservatório da Usina Hidrelétrica da Camargos: Caracterização da Pegada Hídrica**. 2014. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

_____. Pegada hídrica de usinas hidrelétricas. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília - DF.

CEEE. **Plano de Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório da UHE Bugres - Reservatório Blang**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. 2011a

_____. **Plano de Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório da UHE Bugres - Reservatório Divisa**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. 2011b

_____. **Plano de Uso e Ocupação do Solo no Entorno do Reservatório da UHE Canastra**. Companhia Estadual de Energia Elétrica. 2011c

_____. **Planos de uso e ocupação do solo no entorno dos reservatórios das usinas hidrelétricas da CEEE-GT.** Companhia Estadual de Energia Elétrica. 2011d

CELESC. **Fornecimento de dados acerca dos reservatórios associados ao aproveitamento Palmeiras mediante solicitação.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida em 09/03/2016.

CONSÓRCIO EMPRESARIAL SALTO PILÃO. **Desenho Técnico.** 20---a. Disponível em: < <http://www.usinasaltopilao.com.br/obra/desenho.asp> >. Acesso em: 02 março 2016.

_____. **A Obra - Ficha Técnica.** 20---b. Disponível em: < <http://www.usinasaltopilao.com.br/obra/fichatecnica.asp> >. Acesso em: 02 março 2016.

COOLEY, H.; FULTON, J.; GLEICK, P. H. **Water for Energy: Future Water Needs for Electricity in the Intermountain West.** Pacific Institute. Oakland, EUA. 2011

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil - Isoietas Anuais na escala 1:5.000.000.** 2010. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html> >. Acesso em: 18 maio 2016.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais.** 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology.** Prentice Hall, 1994. ISBN 002329745X.

DOS REIS, R. J.; DIAS, N. L. S. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, v. 208, n. 3-4, p. 135-147, 7/31/ 1998. ISSN 0022-1694. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169498001607> >.

EMBRAPA. **Clima.** 2016. Disponível em: < <http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm> >. Acesso em: 28 maio 2016.

EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos.** Ministério de Minas e Energia. Brasília, Brasil. 2015

_____. **Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2015** 2016a. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9t>

ricaporclasse(regi%C3%B5esesubistemas)%E2%80%932011-2012.aspx >. Acesso em: 11 jun. 2016.

_____. **Nível d'água a montante e a jusante e áreas superficiais dos reservatórios de 36 aproveitamentos hidrelétricos do Sul do Brasil.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida em 16/06/2016.

EPRI. **U.S. Water Consumption for Power Production—The Next Half Century.** Palo Alto, EUA. 2002

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. **Journal of water resources planning and management**, 2006.

FERREIRA, F. F. **Pegada Hídrica da geração de energia hidrelétrica no Brasil – Um estudo de caso da AES Tietê S.A.** 2014. 93 p. Projeto de Graduação UFRJ/Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FTHENAKIS, V.; KIM, H. C. Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 2039-2048, 9// 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000638> >.

GERALDI, N. **Sistema Salto de Usinas.** 20---. Disponível em: < <http://ngc44-canela.blogspot.com/2013/03/sistema-salto-de-usinas-hidroeletricas.html-.V03Z5pMr1lg> >. Acesso em: 31 maio 2016.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, T. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, v. 68, n. 4, p. 1052-1060, 2/15/ 2009. ISSN 0921-8009. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180090800339X> >.

GLEICK, P. H. Environmental consequences of hydroelectric development: The role of facility size and type. **Energy**, v. 17, n. 8, p. 735-747, 1992/08/01 1992. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054429290116H> >.

HERATH, I. et al. The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 14, p. 1582-1589, 2011. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611001636> >.

HOEKSTRA, A. Y. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 564-573, 7// 2016. ISSN 1470-160X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16300474> >.

HOEKSTRA, A. Y. et al. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. Earthscan, 2011. 203 ISBN 9781849712798. Disponível em: < <http://doc.utwente.nl/78458/> >.

IBGE. **Área Territorial Brasileira - Consulta por Unidade da Federação**. 2016a. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm> >. Acesso em: 16 março 2016.

_____. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2016b. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/> >. Acesso em: 16 jun. 2016.

IEA. **Water for energy: is energy becoming a thirstier resource?** International Energy Agency. Paris, França. 2012

IPCC. **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, EUA. 2012

ITAIPU. **Geração mensal de Itaipu**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida em

KOHLI, A.; FRENKEN, K.; SPOTTORNO, C. **Disambiguation of water use statistics**. FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura 10/09/15. 2010

LACTEC. **Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha Neto**. 20--

MCMAHON, T. A. et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 17, n. 4, p. 1331-1363, 2013a. ISSN 1607-7938. Disponível em: < <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1331/2013/> >.

_____. **Morton WREVP Fortran code**. 2013b. Disponível em: < <http://people.eng.unimelb.edu.au/mpeel/morton.html> >. Acesso em: 24 ago. 2015.

MCVICAR, T. R. et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 416-417, p. 182-205, 1/24/ 2012. ISSN 0022-1694. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411007487> >.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of electricity from hydropower. **Hydrology and earth system sciences**, v. 16, p. 179-187, 2012. ISSN 1027-5606. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-179-2012> >.

MORTON, F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, n. 1-4, p. 1-76, 1983a. ISSN 0022-1694. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169483901774> >.

_____. Operational estimates of lake evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 66, n. 1, p. 77-100, 1983b. ISSN 0022-1694. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169483901786> >.

_____. Practical Estimates of Lake Evaporation. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 25, n. 3, p. 371-387, 1986. ISSN 0733-3021. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C0371:PEOLE%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C0371:PEOLE%3E2.0.CO;2) >. Acesso em: 2015/11/11.

MULDER, K.; HAGENS, N.; FISHER, B. Burning Water: A Comparative Analysis of the Energy Return on Water Invested. **Ambio**, v. 39, n. 1, p. 30-39, recebido em 16/04/2010, aceito em 01/10/2010. ISSN 0044-7447 1654-7209. Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3357661/> >.

ONS. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Rio de Janeiro. 2004

PASQUALETTI, M.; KELLEY, S. **The water costs of electricity in Arizona**. Arizona Water Institute. 2008

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1948, The Royal Society. p.120-145.

POSTEL, S. L. Entering an Era of Water Scarcity: The Challenges Ahead. **Ecological Applications**, v. 10, n. 4, p. 941-948, 2000. ISSN 10510761. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2641009> >.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972. Disponível em: < <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281972%29100%3C0081%3AOTAOSH%3E2.3.CO%3B2> >.

RODRÍGUEZ, D. **El nexa agua-energía-alimentación nos da la oportunidad para el cambio a un sistema circular**. 2016. Disponível em: < <http://www.iagua.es/noticias/aqualogy/16/05/26/nexo-agua-energia-alimentacion-nos-da-oportunidad-cambio-sistema-circular-.V0hygsetZ6R.linkedin> >. Acesso em: 26 maio 2016.

SANTA CATARINA. **Panorama dos recursos hídricos de Santa Catarina.** Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis, SC. 2007

SANTOS, H. V. D. **Rio Jacuí - Estiagem também afeta a geração de energia elétrica no RS.** Hidrovias Interiores - RS, 2012. Disponível em: < <http://hidroviasinteriores.blogspot.com/2012/05/rio-jacui-estiagem-tambem-afeta-geracao.html> >. Acesso em: 31 maio 2016.

SANTOS, L. J. C. et al. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano, v. 7, p. 3-12, 2006.

SEARA, R. W. **Avaliação do desempenho da barragem da usina hidrelétrica Governador Parigot de Souza (Capivari-Cachoeira).** 2010. Dissertação (Mestrado) Escola de Minas / UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto

STILLWELL, A. S. et al. The Energy-Water Nexus in Texas. **Ecology and Society**, v. 16, 2011. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10535/7466> >.

TORCELLINI, P.; LONG, N.; JUDKOFF, R. **Consumptive water use for us power production.** Golden: National Renewable Energy Laboratory. 2004

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. ISBN 8590082369.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LANJERI, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 8, p. 1103-1118, 2007. ISSN 1097-0088. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1460> >. Acesso em: 29 maio 2015.

WILSON, W.; LEIPZIG, T.; GRIFFITHS-SATTENSPIEL, B. **Burning our rivers - the water footprint of electricity.** River Network. Portland, EUA. 2012

APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA FIXOS PARA O MODELO WREVAP POR APROVEITAMENTO

Aproveitamento	Código Único de Empreendimentos de Geração (ANEEL)	Potência outorgada (MW)	Altitude (m)	Salinidade (ppm)	Profundidade média (m)	Área alagada (km²)
14 de Julho	UHE.PH.RS.027556-5.01	100	104,00	2,50	26,00	4,96
Barra Grande	UHE.PH.SC.027401-1.01	690	647,00	2,50	167,00	89,86
Bugres	UHE.PH.SC.030415-8.01	19	826,10	2,50	25,50	12,65
Campos Novos	UHE.PH.SC.001356-0.01	880	660,00	2,50	176,40	32,00
Canastra	UHE.PH.RS.001152-5.01	45	546,83	2,50	26,00	0,05
Canoas I	UHE.PH.SC.002167-9.01	83	351,00	2,50	16,80	29,11
Canoas II	UHE.PH.SC.001945-3.01	72	366,00	2,50	14,80	23,52
Capivara (Escola de Engenharia Mackenzie)	UHE.PH.SC.028564-1.01	619	334,00	2,50	48,80	575,26
Castro Alves	UHE.PH.RS.028354-1.01	130	240,00	2,50	45,00	4,11
Chaminé - Vossoroca	UHE.PH.RS.000012-4.01	18	722,80	2,50	7,00	4,24
Chavantes	UHE.PH.RS.000324-7.01	414	474,00	2,50	75,30	400,08
Dona Francisca	UHE.PH.RS.000635-1.01	125	94,50	2,50	43,50	18,90
Foz do Chapecó	UHE.PH.SP.000647-5.01	855	265,00	2,50	51,80	80,44
Fundão	UHE.PH.SP.027092-0.01	120	705,50	2,50	16,40	2,18
Garibaldi	UHE.PH.SP.000657-2.01	192	705,00	2,50	45,00	27,53
Governador Bento Munhoz da Rocha Neto (Foz do Areia)	UHE.PH.RS.000718-8.01	1676	742,00	2,50	41,60	141,91
Governador José Richa (Salto Caxias)	PCH.PH.PR.000753-6.01	1240	325,00	2,50	25,30	141,43

Aproveitamento	Código Único de Empreendimentos de Geração (ANEEL)	Potência outorgada (MW)	Altitude (m)	Salinidade (ppm)	Profundidade média (m)	Área alagada (km²)
Governador Ney Aminthas de Barros Braga (Segredo)	UHE.PH.SP.000764-1.01	1260	607,00	2,50	36,60	80,58
Governador Parigot de Souza (Capivari/Cachoeira)	UHE.PH.RS.027012-1.01	260	845,00	2,50	13,30	12,79
Guaricana	UHE.PH.PR.028360-6.01	36	707,00	2,50	7,90	7,00
Itá	UHE.PH.PR.000984-9.01	1450	370,00	2,50	106,00	141,18
Itaipu	UHE.PH.PR.002591-7.01	7000	220,00	2,50	18,58	1369,12
Itaúba	UHE.PH.PR.002715-4.01	500	184,00	2,50	91,30	17,00
Jacuí / Leonel de Moura Brizola	UHE.PH.PR.001042-1.01	180	279,90	2,50	24,45	4,80
Machadinho	UHE.PH.PR.001075-8.01	1140	480,00	2,50	105,20	78,92
Mauá	UHE.PH.PR.001161-4.01	361	635,00	2,50	25,50	83,85
Monte Claro	UHE.PH.RS.027019-9.01	130	148,00	2,50	25,00	1,31
Ourinhos	UHE.PH.RS.001217-3.01	44	398,00	2,50	10,85	4,33
Palmeiras	UHE.PH.PR.029598-1.01	25	639,00	2,50	12,00	3,92
Passo Fundo	UHE.PH.RS.027968-4.01	226	598,00	2,50	47,00	150,27
Passo Real	UHE.PH.SP.027872-6.01	158	327,00	2,50	47,70	224,73
Passo São João	UHE.PH.RS.002001-0.01	77	128,35	2,50	8,50	20,60
Quebra Queixo	UHE.PH.RS.002003-6.01	120	549,00	2,50	122,30	5,18
Rosana	UHE.PH.RS.029456-0.01	354	258,00	2,50	20,00	217,66
Salto Grande (Lucas Nogueira Garcez)	UHE.PH.SP.002555-0.01	74	384,67	2,50	18,07	11,59

Aproveitamento	Código Único de Empreendimentos de Geração (ANEEL)	Potência outorgada (MW)	Altitude (m)	Salinidade (ppm)	Profundidade média (m)	Área alagada (km²)
Salto Osório	UHE.PH.SP.002648-4.01	1078	397,00	2,50	56,00	56,00
Salto Pilão	UHE.PH.PR.002659-0.01	192	319,00	2,50	3,00	0,15
Salto Santiago	UHE.PH.PR.002672-7.01	1420	506,00	2,50	19,70	208,24
Santa Clara	UHE.PH.PR.028361-4.01	120	805,00	2,50	20,60	20,13
São José	UHE.PH.RS.029459-4.01	51	154,67	2,50	21,81	23,46
Taquaruçu (Escola Politécnica)	UHE.PH.SP.002821-5.01	525	284,00	2,50	25,50	74,58

APÊNDICE B – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PARA OBTENÇÃO DE SÉRIES HISTÓRICAS DE TEMPERATURA MÉDIA DO AR, UMIDADE MÉDIA DO AR E INSOLAÇÃO MÉDIA DIÁRIA

Estação	Entidade	Código ANA	Código OMM	Aproveitamento(s) vinculado(s)	Distância ao(s) aproveitamento(s) (km)
Bandeirantes	IAPAR	2350018	N/D	Canoas I	24,5
				Canoas II	21,0
				Salto Grande	42,0
Bela Vista do Paraíso	IAPAR	2251027	N/D	Capivara	36,3
Bento Gonçalves	INMET	2951003	83941	14 de Julho	18,0
				Castro Alves	20,8
				Monte Claro	13,4
Bom Jesus	INMET	2850001	83919	Bugres	79,1
				Canastra	79,6
Campos Novos	INMET	N/D	83887	Barra Grande	44,0
				Campos Novos	27,1
				Garibaldi	34,0
				Machadinho	60,5
Chapecó	INMET	2752016	83883	Itá	32,5
				Passo Fundo	51,8
				Quebra Queixo	49,9
Cruz Alta	INMET	2853005	83912	Jacuí	63,4
				Passo Real	60,3
Curitiba	INMET	2549029	83840	Chaminé	34,7
Francisco Beltrão	IAPAR	2653025	N/D	Salto Osório	61,2

Estação	Entidade	Código ANA	Código OMM	Aproveitamento(s) vinculado(s)	Distância ao(s) aproveitamento(s) (km)
Guarapuava	IAPAR	2551055	N/D	Fundão	63,7
				Santa Clara	56,1
Guaraqueçaba	IAPAR	2548039	N/D	Gov. Parigot de Souza	37,1
Indaial	INMET	2649038	83872	Palmeiras	31,2
				Salto Pilão	32,1
Iraí	INMET	2753003	83881	Foz do Chapecó	21,9
Joaquim Távora	IAPAR	2349030	N/D	Chavantes	46,9
				Ourinhos	49,2
Morretes	IAPAR	25480380	N/D	Guaricana	28,3
Palmas	IAPAR	2651006	83860	Gov. Rocha Neto	37,1
Paranavaí	IAPAR	2352064	N/D	Rosana	68,1
				Taquarucu	78,9
Pato Branco	IAPAR	2652042	N/D	Gov. Braga	66,4
				Salto Santiago	52,2
Planalto	IAPAR	2553015	N/D	Gov. Richa	37,1
				Itaipu	88,4
Santa Maria	INMET	2953017	83936	Dona Francisca	52,1
				Itaúba	69,8
São Luiz Gonzaga	INMET	2854011	83907	Passo São João	30,1
				São José	28,2
Telêmaco Borba	IAPAR	2450011	N/D	Mauá	31,4

Nota: N/D – Dado não disponível

APÊNDICE C – PROCEDIMENTO PADRÃO PARA GERAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE PEGADA HÍDRICA